



# Projeto de uma Estação de Sistema de Vácuo

**DAVID ROSA DOS SANTOS JUNIOR**  
outubro de 2020

## **PROJETO DE UMA ESTAÇÃO DE SISTEMA DE VÁCUO**

David Rosa dos Santos Junior  
1191126

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



## **PROJETO DE UMA ESTAÇÃO DE SISTEMA DE VÁCUO**

David Rosa dos Santos Junior  
1191126

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Leonardo José da Silva Ribeiro.

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica





## JÚRI

### **Presidente**

Engeheira doutura Ana Raposo João

Professora adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

### **Orientador**

Engenheiro doutor Leonardo José da Silva Ribeiro

Professor adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

### **Arguente**

Engenheiro doutor Adélio Cavadas

Professor adjunto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## AGRADECIMENTOS

Tenho a agradecer a cada um que depositou confiança e apoio a mim no desenvolvimento durante o período de realização deste trabalho, deixando imensa gratidão a estes que contribuíram mesmo de forma indireta. Desde meus familiares expressando profundo incentivo desde o princípio, os antigos amigos proporcionando distrações e compartilhando momentos, e as várias e fortes amizades conquistadas durante a transformação do Porto em um lar.

Em especial, direciono minha gratidão ao coordenador do curso pelo IFSC Lages, Matheus Fontanelle, responsável pelo hábil avanço da parceria do intercâmbio, juntamente ao Eng. Francisco Silva representante do ISEP, tornando possível toda essa experiência. Agradecer também ao engenheiro orientador Leonardo, por toda a disposição e consultorias prestadas, com grande prontidão e objetividade nestas durante as reuniões realizadas.

Outros expoentes que valem acentuar, dos quais incluem meu colega e parceiro Gabriel, as icônicas famílias desenvolvidas nos diferentes semestres de minha residência universitária com as mais distintas e marcantes personalidades as quais tive o prazer de partilhar meus dias, além de quem esteve em meu lado a tempo integral, não só figurativamente como presencialmente prestando total apoio e carinho, Chayanne.

A empresa Continental Mabor juntamente o seu vasto quadro de colaboradores, em especial aqueles que estiveram envolvidos na rotina exercida e desenvolvimento deste trabalho, desde a simpática equipe de limpeza até a coordenação do estágio, por me proporcionarem esta experiência repleta de novos conhecimentos, envolto a imersão direta em um meio industrial de tal porte. E principalmente a Viviane e David, meus pais, os quais proveram total suporte e apoio durante todo o processo e toda esta experiência. Para todas estas pessoas incríveis deixo meu muito obrigado!



## PALAVRAS CHAVE

Estação de vácuo, Otimização, Permutadores de Calor, Dimensionamento, Pressão.

## RESUMO

A presente dissertação fora desenvolvida a partir de uma parceria estabelecida entre o Instituto Superior de Engenharia do Porto referênte ao mestrado em engenharia mecânica, com especialização na área de energia em conjunto com a empresa Continental Mabor. Este estudo fora executado como estágio curricular no setor industrial da empresa.

O presente trabalho se baseou essencialmente em torno do projeto da expansão da produção referênte à estação de sistema de vácuo, denominada VS2 (*Vacuum System Station 2*). Inicialmente como objetivo proposto buscar uma otimização dinâmica sob uma visão global do projeto, esta realizada através de ferramentas de CAD (*Computer Aided Design*), buscando um projeto otimizado além de proporcionar um melhor entendimento do processo, tendo como requisito o circuito fechado de arrefecimento, ou seja, o fluido frio não entra em contato com os demais fluidos do processo, a fim da não contaminação deste, permitindo reutilização e tratamento contínuo das águas destinadas a este fim. As entradas foram criteriosamente estipuladas para uma maior precisão dos cálculos subsequentes, os principais componentes deste sistema foram devidamente dimensionados, seguindo uma metodologia previamente estipulada, para bombas, permutadores e tanques. Por fim, fora criado um diagrama geral buscando uma visão global, e resumindo as informações essenciais da estação. Findando ja com uma base pré definida perante análises decorrentes, uma disposição geral fora pensada e expressa via modelagem 3D, a fim de encontrar os ajustes finais além de proporcionar a vista global do sistema projetado, de forma a expor todos os elementos abordados além da inclusão dos demais sistemas secundários e suas implicações físicas, diante deste processo se obteu uma estação muito mais compactada e contornando superdimensionamentos de empresas terceiras, além de proporcionar um melhor conhecimento dos parâmetros e processos envolvidos.

Findando o projeto da VS2, são postas sugestões para futuros estudos a fim de uma compreensão ainda melhor do processo podendo identificar com precisão os parâmetros existentes em cada ponto deste, permitindo desta forma otimizar ainda mais a eficiência da estação e dimensionamento mais eficaz dos componentes envolvidos. Esta fica como modelo de referência e com total dinamicidade para otimizações no entorno do sistema.



**KEYWORDS**

*Vacuum Station, Optimization, Heat Exchanger, Sizing, Pressure.*

**ABSTRACT**

*The present dissertation was developed based on a partnership established between the Instituto Superior de Engenharia do Porto regarding the master's degree in mechanical engineering, with specialization in the energy area and the company Continental Mabor. This study had been performed as a curricular internship in the company's industrial sector.*

*The present work was essentially based around the expansion project referring to the vacuum system station, denominated VS2 (Vacuum System Station 2). Initially as a proposed objective to seek a dynamic optimization under a global vision of the project, this was developed through CAD (Computer Aided Design) software tools, seeking an optimized layout in addition to providing a better understanding of the process, having as a requirement the closed cooling circuit, that is, the cold fluid does not come into contact with the other fluids in the process, in order to avoid contamination, allowing reuse and continuous treatment of the water destined for this purpose. The inputs were carefully stipulated for greater accuracy of subsequent calculations, the main components of this system were properly dimensioned, following a previously stipulated methodology, for pumps, heat exchangers and tanks. Finally, a general diagram was created seeking an overview and summarizing the essential information of the station. Finally, with a pre-defined basis in view of the resulting analyzes, a general arrangement had been thought and expressed via 3D modeling, in order to find the final adjustments in addition to providing the global view of the projected system, in order to expose all the elements addressed in addition to the inclusion of other secondary systems and their physical implications, in the face of this process a much more compacted station was obtained and bypassing over-dimensioning of third-party companies, in addition to providing a better knowledge of the parameters and processes involved.*

*Once the VS2 project is finished, suggestions are made for future studies in order to understand the process even better, being able to accurately identify the parameters existing at each point of the process, thus allowing further optimization of the station's efficiency and more effective dimensioning of the components involved. . This remains as a reference model and with total dynamism for optimizations around the system.*





## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
DN	Diâmetro Nominal
APTA	Associação de Produtores de Tubos em Aço
EN	Norma Europeia
NP	Norma Portuguesa
ISO	<i>International Organization of Standardization</i>
PI&D	<i>Piping and instrumentation Diagram</i>
TEMA	<i>Tubular Exchanger Manufacturers</i>
MES	<i>Machine and Equipment Standard</i>

### Lista de Unidades

m	Metros
kg	Quilogramas
s	Segundos
l	Litros
Pa	Pascal
mol	Mole
K	Kelvin
°C	Grau Celsius
J	Joule
W	Watt

### Lista de Símbolos

L	Comprimento, m
m	Massa, kg
t	Tempo, s
V	Volume, m <sup>3</sup>
A	Área, m <sup>2</sup>
g	Aceleração Gravítica, m/s <sup>2</sup>
h	Altura, m
<i>v</i>	Velocidade, m/s
$P_{tot}$	Pressão total, Pa
$P_{atm}$	Pressão atmosférica, Pa
$P_{relativa}$	Pressão relativa, Pa

## Lista de Símbolos (continuação)

$Z$	Altitude, m
$t_{ciclo}$	Tempo de ciclo, s
$\dot{m}$	Caudal mássico, kg/s
$Q$	Caudal volúmico, m <sup>3</sup> /s
$M$	Massa molar, g/mol
$Q$	Carga térmica, J/s
$h_p$	Coeficiente de perda de carga contínua
$K_s$	Coeficiente de perda de carga localizada
$\Delta T_{ln}$	Diferencial logarítmico de temperaturas, K
$c_p$	Calor específico, J/(kg K)
$D_c$	Diâmetro da carcaça, m
$T_{q0}$	Temperatura do fluido quente na entrada, K
$T_{q1}$	Temperatura do fluido quente na saída, K
$T_{f0}$	Temperatura do fluido frio na entrada, K
$T_{f1}$	Temperatura do fluido frio na saída, K
$F$	Factor de eficiência
$N_t$	Número de tubos
$N_c$	Número de chicanas
$v$	Volume específico, m <sup>3</sup> /kg
$\rho$	Densidade, kg/m <sup>3</sup>
$P$	Parâmetro de correlação entre temperaturas
$R$	Parâmetro de correlação entre temperaturas
$R_f$	Resistência à incrustação, m <sup>2</sup> K/W
$k$	Condutibilidade térmica, W/(m K)
$d$	Diâmetro, m
$h$	Coeficiente de transferência de calor, W/(m <sup>2</sup> K)
$U$	Coeficiente global de transferência de calor, W/(m <sup>2</sup> K)
$f$	Factor de correção
$f_c$	Factor de fricção na carcaça
$f_t$	Factor de fricção nos tubos
$Pr$	Número de Prandtl
$Re_c$	Número de Reynolds na carcaça
$Re_t$	Número de Reynolds nos tubos
$Nu_b$	Número de Nusselt
$CL$	Constante referente a disposição dos tubos
$CTP$	Constante referente ao número de tubos
$P_t$	Passo entre tubos, m
$d_i$	Diâmetro interno do tubo, m
$d_e$	Diâmetro externo do tubo, m
$G_c$	Velocidade mássica na carcaça, kg/(s m <sup>2</sup> )

## Lista de Símbolos (continuação)

$\Delta P_c$	Perda de carga na carcaça, Pa
$\Delta P_t$	Perda de carga nos tubos, Pa
$\mu_p$	Viscosidade dinâmica na parede, N s/m <sup>2</sup>
$\mu_c$	Viscosidade dinâmica na carcaça, N s/m <sup>2</sup>
$\mu_t$	Viscosidade dinâmica nos tubos, N s/m <sup>2</sup>
$v_m$	Velocidade de transição, m/s
$A_{tp}$	Área de transição dos tubos, m <sup>2</sup>



## GLOSSÁRIO DE TERMOS

VS1	<i>Vacuum Station 1</i>
VS2	<i>Vacuum Station 2</i>
<i>Blowdown</i>	Tanque de descarga dos condensados provenientes do processo de vulcanização
Pneu verde	Pneu antes do processo de vulcanização
MES	Documento da Continental regente de alguns dos requisitos respetivos aos equipamentos abordados
Janela	Abertura entre o nível térreo e subterrâneo
A01	Tanque do ciclo de água para selante das bombas de vácuo
A02; A03	Tanques destinados à separação de condensados do vapor
A04	Tanque destinado à acumulação e filtragem dos condensados
W01	Permutador de calor do ciclo de selante
W02; W03	Permutadores de calor condensadores de vapor



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOGO DA CONTINENTAL.	1
FIGURA 2 - VISTA AÉREA DAS INSTALAÇÕES CONTINENTAL MABOR.	2
FIGURA 3 - EXEMPLO DE PNEU COM SEUAS RESPECTIVAS CAMADAS, ADAPTADO DE (“CONTI CROSSTRAC HD3”, CONTINENTAL AG)	7
FIGURA 4 – ETAPAS DO CICLO DE VUNCANIZAÇÃO EM PRENSA DE CURA.	10
FIGURA 5 - DISPOSIÇÃO DAS LINHAS DE VÁCUO E PRENSAS.	11
FIGURA 6 - PLANTA DE VULCANIZAÇÃO POR ESTAÇÃO DE VÁCUO.	12
FIGURA 7 – P&ID DE SISTEMA DE VÁCUO ATUAL (RAFAEL ET AL. 2014).	13
FIGURA 8 - ZONAS DE PRESSÃO ABRANGIDAS POR TIPO DE BOMBA. (ADAPTADO DE TECNOLOGIA DE VÁCUO)	14
FIGURA 9 - BOMBA DE ANEL LÍQUIDO, ADAPTADO DE (BUSCH BOMBAS E SISTEMAS DE VÁCUO BRASIL).	15
FIGURA 10 CRITÉRIOS UTILIZADOS NA CLASSIFICAÇÃO DE PERMUTADORES DE CALOR, ADAPTADO DE (HEAT EXCHANGERS).	16
FIGURA 11 - PERMUTADOR DO TIPO CARÇAÇA E TUBOS.	17
FIGURA 12 – PROCESSOS DE LIGAÇÃO, ADAPTADO DE (APTA).	19
FIGURA 13 - ACESSÓRIOS DE TUBAGENS (A) CURVA 90º, (B) CURVA 45º, (C) RETORNO 180º, (D) TÊ ESCOAMENTO LINEAR, (E) TÊ ESCOAMENTO ENTRONCADO, (F) UNIÃO ROSCADA.	20
FIGURA 14 – BOMBAS DE CONDENSADOS SPIRAX (ESQUERDA) E GRUNDFOS (DIREITA) (“SPIRAX SARCO”),(NB, NBE).	22
FIGURA 15 - EXEMPLO DE VÁLVULA DE BLOQUEIO DE COMPORTA ABERTA (ESQUERDA) E FECHADA (DIREITA), ADAPTADO DE (“FBV”).	23
FIGURA 16 - EXEMPLO DE VÁLVULA DE REGULAGEM DE GLOBO ABERTA (ESQUERDA), PARCIALMENTE ABERTA (CENTRO) E FECHADA (DIREITA), ADAPTADO DE (“FBV”).	24
FIGURA 17 – TERMOPAR INDUSTRIAL (“ENDRESS+HAUSER”).	25
FIGURA 18 – CAUDALÍMETRO (“ENDRESS+HAUSER”).	26
FIGURA 19 – MANÔMETRO INDUSTRIAL (“ENDRESS+HAUSER”).	26
FIGURA 20 – PLANTA DA REGIÃO DE INSTALAÇÃO: ÁREA HACHURADA A DESTINADA A CONEXÕES ENTRE PISO INFERIOR E SUPERIOR PRÓXIMO AO CORREDOR DE PRENSAS.	28
FIGURA 21 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO PARA PROJETO.	31
FIGURA 22 - DIFERENÇAS DE TEMPERATURAS AO LONGO DO TUBO PARA OS FLUXOS: (A) PARALELO E (B) CONTRACORRENTE.	34
FIGURA 23 - DISPOSIÇÃO DOS TUBOS EM RELAÇÃO AO ESCOAMENTO.	35
FIGURA 24 - REPRESENTAÇÃO DO ESPAÇO E JANELA.	44
FIGURA 25 - ESTIMATIVA INICIAL COM BASE EM INSTALAÇÕES SEMELHANTES.	44
FIGURA 26 - MODELAGEM BASE DA GALERIA.	45
FIGURA 27 - SIMULAÇÃO DA ESTAÇÃO COM BOMBAS EM PARALELO EM VISTA SUPERIOR.	46
FIGURA 28 - DISPOSIÇÃO COM A ABERTURA NA VERTICAL.	47
FIGURA 29 - DISPOSIÇÃO COM A ABERTURA HORIZONTAL.	47



FIGURA 30 - PROFUNDIDADES DAS GALERIAS.	48
FIGURA 31 - ENSAIO DO CORREDOR COM TUBOS LADO A LADO.	49
FIGURA 32 - FREQUÊNCIA DE FLUXO DE CARRINHAS NOS CORREDORES.	50
FIGURA 33 - DISTÂNCIA ENTRE OS CENTROS DE TUBAGENS INCLUINDO REVESTIMENTO VIA NORMA.	51
FIGURA 34 - PROJETO FINAL DE PROFUNDIDADES.	52
FIGURA 35 - TUBO DE DRENAGEM COM DECLÍNIO NO CORREDOR.	52
FIGURA 36 - DEFINIÇÃO DA ESCADA EM VISTA SUPERIOR.	53
FIGURA 37 - GRÁFICO DE TEMPERATURAS DA ÁGUA NO ANO DE 2019.	54
FIGURA 38 - GRÁFICO DE ALTITUDES NA REGIÃO DA EMPRESA.	56
FIGURA 40 – CAVIDADES A USAR VÁCUO DURANTE 10 MINUTOS. (RAFAEL ET AL. 2014)	57
FIGURA 39 – GRUPOS ANALISADOS.	58
FIGURA 41 – PREVISÃO DA DISPOSIÇÃO DAS TUBAGENS NO CORREDOR ATUAL, SENDO NOVAS AS LINHAS DE CONDENSADOS E ÁGUA.	62
FIGURA 42 - SIMULAÇÃO DE TUBAGENS, (A) VISTA LATERAL, (B) VISTA SUPERIOR E (C) VISTA EM PERSPETIVA.	63
FIGURA 43 - GRÁFICO CAUDAL X PERDA DE CARGA PARA ÁGUA DE ARREFECIMENTO.	64
FIGURA 44 - MANUAL DE SELEÇÃO PARA MONTAGEM DA BOMBA, ADAPTADO DE (DUE JENSENS 2004).	65
FIGURA 45 - CONJUNTO DE BOMBAS DE CONDENSADOS UTILIZADO PELA CONTINENTAL MABOR.	67
FIGURA 46 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PERMUTADORES W02 E W03.	74
FIGURA 47 - TANQUE DE ALIMENTAÇÃO DAS BOMBAS DE VÁCUO. ESQUEMÁTICA EM PLANO DIREITO (ESQUERDA) E VISTA ISOMÉTRICA (DIREITA).	78
FIGURA 48 - TANQUE DE SEPARAÇÃO DOS CONDENSADOS, ESQUEMÁTICA (ESQUERDA) E VISTA ISOMÉTRICA (DIREITA).	79
FIGURA 49 – VISTA ISOMÉTRICA (ESQUERDA) E DIMENSÕES (DIREITA) DO ESTUDO PRELIMINAR PERANTE O TANQUE A04.	80
FIGURA 50 – TANQUE A04, ESQUEMÁTICA EM VISTA SUPERIOR (ESQUERDA) E VISTA EM PERSPETIVA (DIREITA).	81
FIGURA 51 - SIMULAÇÃO DAS PROTEÇÕES FÍSICAS.	82
FIGURA 52 - REPRESENTAÇÃO DAS VÁVULAS.	83
FIGURA 53 - DIAGRAMA PI&D GLOBAL DO SISTEMA.	85
FIGURA 54 - ESTRUTURA MODULAR, VISTA FRONTAL (ESQUERDA) E VISTA ISOMÉTRICA (DIREITA).	87
FIGURA 55 - VISTA ISOMÉTRICA DO CONJUNTO CENTRAL.	88
FIGURA 56 - VISTA SUPERIOR DA ESTAÇÃO RESSALTANDO A LINHA DE CONEXÕES ELÉTRICAS DOS MÓDULOS (CIRCULADOS E UTA PONTILHADA) A PARTIR DO PAINEL GERAL.	89
FIGURA 57 - VISTA EM PERSPETIVA FRONTAL DA ESTACAÇÃO.	89
FIGURA 59 - VISTA ISOMÉTRICA DA ESTAÇÃO.	90
FIGURA 59 - VISTA ISOMÉTRICA COM ELEMENTOS SUPRIMIDOS.	90
FIGURA 60 - UMA PASSAGEM NO CASCO E DUAS OU MÚLTIPLAS DE DUAS NOS TUBOS (CASO 1).	102
FIGURA 61 - GRÁFICO DO FATOR DE CORREÇÃO PARA O CASO 1. (KAKAÇ ET AL. 2012)	102
FIGURA 62 - DUAS PASSAGENS NO CASCO E QUATRO OU MÚLTIPLAS DE QUATRO NOS TUBOS (CASO 2).	103
FIGURA 63 - GRÁFICO DO FATOR DE CORREÇÃO PARA O CASO 2. (KAKAÇ ET AL., 2012)	103

FIGURA 64 - TRÊS PASSAGENS NO CASCO E SEIS OU MAIS NOS TUBOS (CASO 3).	103
FIGURA 65 - GRÁFICO DO FATOR DE CORREÇÃO PARA O CASO 3. (KAKAÇ ET AL., 2012)	104
FIGURA 66 – PASSAGEM DE FLUXO DIVIDIDO NO CASCO (CASO 4).	104
FIGURA 67 - GRÁFICO DO FATOR DE CORREÇÃO PARA O CASO 4. (KAKAÇ ET AL., 2012)	104
FIGURA 68 - PASSAGEM DIVIDIDA DE FLUXO NO CASCO E DUAS PASSAGENS NOS TUBO (CASO 5).	105
FIGURA 69 - GRÁFICO DO FATOR DE CORREÇÃO PARA O CASO 5. (KAKAÇ ET AL., 2012)	105
FIGURA 70 – TABELA DE PROPRIEDADES PARA VAPOR DE ÁGUA SATURADO. (INCROPERA AND DEWITT 2008)	106
FIGURA 71 - PROPRIEDADES DA BOMBA A333.	107



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
TABELA 2 - INFLUÊNCIA DO GRAU DE LIGAÇÕES CRUZADAS SOBRE AS PROPRIEDADES DO VULCANIZADO (ADAPTADO DE PINHEIRO G., MODELOS NUMÉRICOS APLICADOS).	8
TABELA 3 – RELAÇÃO DAS PRESSÕES COM VÁRIAS GRANDEZAS FÍSICAS, ADPTADO DE (MOUTINHO, A. M. C.; SILVA, MARIA EUGÉNIA S. FROTEIRA & CUNHA 1980).	9
TABELA 4 – TIPOS DE BOMBAS DE VÁCUO.	14
TABELA 5 – PERDAS DE CARGA POR ACESSÓRIO, ADAPTADO DE (MUNSON ET AL. 2006).	20
TABELA 6 – FINALIDADE E PRINCIPAIS VÁLVULAS, ADAPTADO DE (TELLES 2012).	23
TABELA 7 – MEIOS DE OPERAÇÃO DAS VÁLVULAS, ADAPTADO DE (TELLES 2012).	24
TABELA 8 - RECOMENDAÇÕES DE CTP POR NÚMERO DE PASSES (KAKAÇ ET AL., 2012).	35
TABELA 9 - CL PARA DIFERENTES DISPOCIÇÕES	35
TABELA 10 - PROPRIEDADES DA ÁGUA DE ARREFECIMENTO	55
TABELA 11 - PROPRIEDADES DO VAPOR EM DIFERENTES ETAPAS.	57
TABELA 12 - VOLUMES DOS DIFERENTES DIAFRAGMS UTILIZADOS.	58
TABELA 13 - PROPRIEDADESDOS DOS RESÍDUOS.	60
TABELA 14 - PROPRIEDADES DO VAPOR SUPRINDO PERDAS DE CARGA.	61
TABELA 15 - PERDA DE CARGA DAS ÁGUAS DE ARREFECIMENTO PARA DIFERENTES VELOCIDADES.	64
TABELA 16 - DADOS DE ENTRADA PERMUTADOR W01.	68
TABELA 17 - PARÂMETROS OBTIDOS PARA O PERMUTADOR W01.	70
TABELA 18 - MEDIDAS COMUNS DE TUBOS PARA DIFERENTES CASOS (TEMA 2007).	70
TABELA 19 - DADOS PRELIMINARES PARA O DIMENSIONAMENTO W01.	71
TABELA 20 - PARÂMETROS DIMENSIONAIS DO PERMUTADOR W01.	71
TABELA 21 - PERDAS DE CARGA E CORREÇÕES PARA O PERMUTADOR W01.	72
TABELA 22 - DIMENSÕES FINAIS DO PERMUTADOR W01.	73
TABELA 23 - DADOS DE ENTRADA DOS PERMUTADORES W02 E W03.	74
TABELA 24 - PARÂMETROS OBTIDOS PARA O PERMUTADOR W02.	75
TABELA 25 - DADOS PRELIMINARES PARA O DIMENSIONAMENTO W02.	75
TABELA 26 - PARÂMETROS DIMENSIONAIS DO PERMUTADOR W02.	76
TABELA 27 - PERDAS DE CARGA E CORREÇÕES PARA O PERMUTADOR W02.	77
TABELA 28 - DIMENSÕES FINAIS DO PERMUTADOR W02.	77
TABELA 29 - LISTA DE NOMENCLATURAS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DA INSTALAÇÃO.	83
TABELA 30 – CARACTERÍSTICAS REQUISITADAS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES.	101



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Continental AG .....	1
1.1.1	Continental Mabor .....	1
1.2	Processo e motivação .....	2
1.3	Objetivos .....	3
1.4	Estruturação .....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1	Produção de pneus.....	7
2.1.1	Prensas de cura .....	9
2.2	Instalação atual .....	12
2.3	Componentes da instalação .....	13
2.3.1	Bombas de vácuo .....	14
2.3.1.1	Bombas de anel d'água .....	15
2.3.2	Permutadores de calor .....	16
2.3.2.1	Permutadores de carcaça e tubos .....	17
2.3.3	Tubagens .....	17
2.3.3.1	Conexões.....	18
2.3.3.2	Perdas de carga.....	19
2.3.4	Bomba de condensados .....	21
2.3.5	Válvulas .....	22
2.4	Monitoramento.....	24
2.5	Instalação industrial .....	27
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	Espaço .....	32

3.2	Condições de entrada .....	32
3.3	Permutadores.....	33
3.3.1	Pré-dimensionamento dos permutadores .....	33
3.3.1.1	Diferenças de temperaturas .....	33
3.3.1.2	Parâmetros geométricos.....	34
3.3.1.3	Perdas de carga.....	37
3.3.2	Dimensionamento .....	39
3.4	Tanques .....	39
3.5	Estudo de disposição.....	40
3.6	Tubagens .....	40
4	DESENVOLVIMENTO .....	43
4.1	Espaço da instalação .....	43
4.1.1	Localização e dimensões .....	45
4.1.2	Posição da abertura.....	46
4.1.3	Profundidade.....	48
4.1.4	Corredor de ligação .....	49
4.1.5	Escadas .....	52
4.2	Condições de entrada .....	53
4.2.1	Águas de arrefecimento .....	53
4.2.2	Vácuo.....	55
4.2.2.1	Caudal .....	57
4.2.2.2	Resíduos.....	60
4.2.2.3	Perdas de carga.....	60
4.3	Tubagens .....	61
4.4	Seleção de bombas .....	65
4.4.1	Bombas de Vácuo .....	65
4.4.2	Bombas para extração de condensados.....	66
4.4.2.1	Bomba do tanque de vácuo .....	66
4.4.2.2	Bomba de extração .....	67
4.5	Dimensionamento dos permutadores .....	67
4.5.1	Permutador W01.....	68
4.5.1.1	Diferenças de temperaturas .....	69
4.5.1.2	Parâmetros geométricos.....	70
4.5.2	Permutadores W02 e W03 .....	73
4.5.2.1	Diferenças de temperaturas .....	74

4.5.2.2	Parâmetros geométricos.....	75
4.6	Tanques .....	78
4.6.1	Ciclo do selante A01 .....	78
4.6.2	Separação de condensados A02 e A03 .....	79
4.6.3	Extração de condensados A04.....	80
4.7	Adequações da empresa .....	81
4.7.1	Pinturas .....	81
4.7.2	Proteções.....	82
4.8	Diagrama da estação .....	82
4.9	Desenho 3D da estação.....	87
5	CONCLUSÕES.....	92
5.1	Conclusões .....	92
5.2	Propostas de trabalhos futuros.....	93
6	BIBLIOGRAFIA .....	97
7	ANEXOS .....	101
7.1	Anexo 1 – Descrição dos principais requisitos da instalação .....	101
7.2	Anexo 2 – Gráficos de identificação do fator de correção (F).....	102
7.3	Anexo 3 - Tabela de propriedades termodinâmicas do vapor .....	106
7.4	Anexo 4 - Especificações da bomba A333.....	107





# INTRODUÇÃO

- 1.1 Continental AG
- 1.2 Processo e motivação
- 1.3 Objetivos
- 1.4 Estruturação

## 1 INTRODUÇÃO

Diante a constante corrida evolutiva existente no meio industrial, para manutenção da competitividade vem a ser essencial a busca pelo desenvolvimento tecnológico, desta forma, cada vez mais se investe no meio acadêmico, visando este avanço da tecnologia além da compreensão e otimização dos processos e instalações já conhecidos, sempre buscando aperfeiçoar e inovar o setor de atuação o qual a empresa esta inserida.

O estudo científico destes processos e instalações é acerto em prol do entendimento e edifica caminhos para a otimização destes. Como resultado destes estudos de otimização, é possível alcançar um aperfeiçoamento relativo a um ou mais retornos para a empresa alvo, podendo estar estes ligados a redução de custos, melhoria de eficiência, produtividade, e ergonomia, entre vários outros. Com uma constante busca por estes desenvolvimentos, a empresa Continental investe esforços, sendo esta uma das referências no segmento visando evolução tecnológica, investindo na ampliação da capacidade de produção juntamente a otimização de sistemas, originando o trabalho apresentado em sequência.

### 1.1 Continental AG

Fundada em 8 de outubro 1871, em Hanôver na Alemanha, a Continental tem o início da sua história voltado para a produção de produtos em borracha suave, tecidos revestidos e pneus maciços, sendo esta a primeira empresa alemã do segmento ("Conti CrossTrac HD3," ). Hoje atua em diversas áreas de tecnologia e inteligência automotiva, bem como produtos e soluções para indústrias, além de diversos esforços aplicados visando o desenvolvimento dos mesmos, empregando mais de 244 mil colaboradores distribuídos entre 53 países. Sua logomarca é apresentada na Figura 1.



Figura 1 - Logo da Continental.

#### 1.1.1 Continental Mabor

Localizada em Lousado, com início em 1989, e fruto da união das duas empresas, Continental AG já posicionada mundialmente, e Mabor (Manufatura Nacional de Borracha S.A.).

Em sua magnitude a Continental Mabor atua tanto no mercado de origem, destinadas a grandes marcas do setor automobilístico com carros novos, quanto no de substituição, respectivo a 60 % da produção. Sua capacidade de produção atinge os 60 mil pneus/dia com funcionamento 24 h/dia seccionado em 3 turnos e com duas paragens ao ano, sendo estas utilizadas para grandes manutenções, expansões e instalação de equipamentos e espaço fabril.

A Continental Mabor é uma das maiores exportadoras deste segmento em Portugal, sendo esta portadora de diversos prêmios nacionais respectivos a este destino, o qual envolve cerca de 98 % da produção da unidade. Esta possui fisicamente diversas instalações voltadas desde administração, passando por engenharia e produção até de estocagem e distribuição dentre outros, conforme é apresentado na Figura 2.



Figura 2 - Vista aérea das instalações Continental Mabor.

## 1.2 Processo e motivação

A produção de pneus pode ser seccionada em 5 distintas etapas, passando por misturação, preparação, construção, vulcanização e inspecção final. Sendo a vulcanização o processo crucial para com a produção dos pneus, descrita detalhadamente nos capítulos subsequentes, tem como uma necessidade para a execução do processo a aplicação de vácuo, sendo este exigido amplamente e produzido em um sistema central e distribuído pelas máquinas. Visando uma ampliação da capacidade produtiva da fábrica, é associada a isto uma ampliação também das capacidades do sistema de vácuo.

O intuito deste trabalho é buscar a otimização deste sistema, de forma que seus componentes críticos serão analisados e submetidos a alterações conforme necessário.

Vale ressaltar que por parte da empresa surge o interesse em que a estação em caso de falha de um componente possa seguir em funcionamento alternativo até solução da emergência abordada. A partir disto se tem a necessidade de inserção de redundâncias e proteções no sistema completo.

Um dos grandes obstáculos para estes tipos de instalação são os dados de entrada, uma vez que não há precisão devido a baixo monitoramento dos valores envolvidos, sendo demasiadamente utilizadas a estipulação e extrapolação. Sendo assim crucial o uso de equipamentos de monitoramento nesta unidos aos componentes devidamente dimensionados, para que assim possa garantir dados e modelos para futuras instalações, além da otimização de seus componentes e um maior controle do processo.

### 1.3 Objetivos

Para este trabalho tem-se por objetivo geral o entendimento e otimização, ou seja, intentar o ótimo buscando melhoria de processo e estrutura da estação de vácuo se partindo do dimensionamento de seus principais componentes e definição do escopo geral.

Os objetivos específicos, inicialmente propostos pela Continental Mabor, estão apontados na Tabela 1, ordenados por expectativa de avanço.

Tabela 1 - Objetivos Específicos

Nº	Objetivo
1	Estipular de forma criteriosa as entradas e saídas do sistema
2	Dimensionar os permutadores de calor envolvidos
3	Elaborar um sistema de extração dos condensados, encaminhando-os para uma central de aproveitamento destes resíduos quentes
4	Estabelecer Redundâncias que garantam continuidade em casos de falhas previstas
5	Definir uma disposição geral da estação e seus agregados
6	Modelar de forma geral a estação e os componentes envolvidos

De forma global, todos os objetivos se comunicam entre si rumando a integração de todos os componentes em modelagem tridimensional, a partir da disposição definida destes incluindo redundancias, e componentes estes dimensionados de acordo com os parâmetros iniciais obtidos.

## 1.4 Estruturação

A organização deste trabalho se fundamenta em seis capítulos, com finalidade de alcançar os objetivos abordados e estes estão ordenados da seguinte forma:

1. Capítulo introdutório, trazendo contextualização em âmbito geral, além de englobamento da empresa envolvida e sua motivação, delineando objetivos pretendidos e organização para sequência do estudo;
2. Segundo capítulo trazendo base teórica bem como pesquisa acerca do problema destacado. Reunindo também equacionamento base para posterior aprofundamento e dimensionamentos;
3. Terceiro capítulo expondo a metodologia abordada e forma base de aplicação a ser seguida nos subsequentes;
4. Quarto capítulo como desenvolvimento, donde se aplicam os conhecimentos abrangidos no segundo capítulo a fim de alcançar os objetivos específicos abordados, seguindo a metodologia exposta no terceiro capítulo. Este apresenta consigo o estudo dinâmico visando otimização de alguns dos principais componentes da instalação, bem como avaliação de fatores influenciadores destes, e ainda avaliação de layout geral conforme sua evolução;
5. Quinto capítulo aborda as conclusões e consolida o projeto final, agregado ainda de sugestões para trabalhos futuros;
6. Sexto capítulo apresentando as referências e fontes donde extraídas as informações.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Produção de pneus
- 2.2 Instalação atual
- 2.3 Componentes da instalação





## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Produção de pneus

O processo de produção de pneus passa por diferentes etapas, sendo estas montagem, preparação, prensagem e controle de qualidade. Durante a fase de montagem são unidos a uma única peça certos componentes, incluindo malhas têxteis, metálicas e plásticas, mas constituído principalmente por borracha conforme apresentado na Figura 3. Após assentadas as partes, o produto apresenta algumas características como baixo ponto de limite de escoamento, consequentemente entra em regime plástico prematuramente, ou seja, facilmente é deformado sem que retorne ao estado inicial, junto a certa fragilidade e superfície pegajosa. Desde esta etapa exibe formato já dimensionado para os processos subsequentes, visando o produto final. Ainda variando dentre diferentes medidas e composições respectivas ao porte do veículo, e finalidade de uso para o mesmo.



Figura 3 - Exemplo de pneu com suas respectivas camadas, adaptado de ("Conti CrossTrac HD3", Continental AG)

Posteriormente as etapas iniciais de montagem e preparação, se tem o denominado pneu verde, o qual é encaminhado e submetido ao processo de vulcanização. Procedimento este que fora descoberto e patenteado em 1840 por Charles Goodyear e Thomas Hancock, nos Estados Unidos e Inglaterra respectivamente, e de forma isolada (Costa et al. 2003).

Atualmente após seu desenvolvimento tecnológico e estudo do processo, se trata de um método onde o pneu verde é prensado sob alta temperatura, adicionando assim calor, e ainda acrescentando catalisadores além de enxofre.

O enxofre atua desta forma como agente de vulcanização, resultando assim com a formação de ligações cruzadas na sua estrutura em melhorias nas propriedades deste material, como alta abrangência do regime elástico, dentre outros presentes na Tabela 2, em se tratando do meio industrial possibilita maior diversificação e aplicabilidade do material.

Tabela 2 - Influência do grau de ligações cruzadas sobre as propriedades do vulcanizado (Adaptado de Pinheiro G., Modelos Numéricos Aplicados).

Propriedade	Comportamento
Rigidez (módulo de young)	Aumenta
Dureza	Aumenta
Resiliência	Aumenta
Relaxação	Diminui
Resistência à abrasão	Aumenta
Resistência à fadiga	Aumenta

O processo de vulcanização é atualmente na atividade fabril de pneus, realizado em prensas de cura onde abastece-se-as com pneu verde, e o mesmo é envolto pelos moldes contendo o negativo do formato final, a prensagem ocorre no sentido do interior do pneu para fora, pois a prensa possui um diafragma em seu centro, que é envolto pelo pneu, e se tem uma pré-carga de alta pressão para centralização do mesmo, posteriormente a cavidade é fechada com o molde, após aquecido o diafragma é insuflado a uma determinada pressão, a fim de empurrar o material contra o molde e assim resultando tanto no formato interno quanto externo.

Após o processo de vulcanização, toda a pressão bem como resíduos acumulados dentro do diafragma que devem ser extraídos, além de encolher o diafragma para que seja feito o posicionamento do próximo pneu, o que tras a tona a aplicação do vácuo, dito quando inferior a densidade de partículas presente em relação a pressões e temperaturas atmosféricas (Moutinho, A. M. C.; Silva, Maria Eugénia S. Froteira & Cunha 1980), ou seja, pressão abaixo da atmosférica no sistema, o que resulta na sucção da cavidade do diafragma.

Ainda no que se diz respeito aos níveis de vácuo, podem ser classificados de acordo com sua magnitude, desde muito próximo à pressão ambiente, e gradativamente mais forte a medida que se afasta negativamente dos níveis desta, são usuais as classificações de pressões de vácuo apresentadas a seguir na Tabela 3.

Tabela 3 – Relação das pressões com várias grandezas físicas, adptado de (Moutinho, A. M. C.; Silva, Maria Eugénia S. Froteira &amp; Cunha 1980).

Pressões (kPa)	Zonas de pressão	Livre percurso médio (m)	Nº de moléculas por cm <sup>3</sup>	Altitudes equivalentes (km)
10 <sup>2</sup>	Pressão atmosférica	7x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>19</sup>	Nível do mar
10	Vácuo			
1				
10 <sup>-1</sup>		7x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>16</sup>	45
10 <sup>-2</sup>	Vácuo primário			
10 <sup>-3</sup>				
10 <sup>-4</sup>		7x10 <sup>-2</sup>	2x10 <sup>13</sup>	90
10 <sup>-5</sup>	Alto vácuo			
10 <sup>-6</sup>				
10 <sup>-7</sup>		70	2x10 <sup>10</sup>	160
10 <sup>-8</sup>	Vácuo muito alto			
10 <sup>-9</sup>				
10 <sup>-10</sup>		7x10 <sup>4</sup>	2x10 <sup>7</sup>	450
10 <sup>-11</sup>	Ultra-alto vácuo			
10 <sup>-12</sup>				
10 <sup>-13</sup>		7x10 <sup>7</sup>	2x10 <sup>4</sup>	1000
10 <sup>-14</sup>				
10 <sup>-15</sup>				
10 <sup>-16</sup>		7x10 <sup>10</sup>	20	

Conforme a necessidade do equipamento é possível classificá-lo e comparar os níveis de vácuo com os valores referenciais presentes na Tabela 3, sendo este o principal parâmetro de entrada para os cálculos posteriores, ressaltando este como enfoque da estação e constante a ser mantida pelos equipamentos abordados.

### 2.1.1 Prensas de cura

Conforme já citado é nas prensas de cura onde se executa o processo final de transformação do pneu chamado vulcanização, apresentado na Figura 4, sendo que representados respectivamente, moldes superior e inferior em metálico, diafragma em amarelo, e por fim tanto pneu verde quanto vulcanizado em preto.

As seguintes etapas são representadas: a) pneu verde posicionado no sistema, b) pneu posicionado verde no sistema em corte, c) pré-carga de vapor saturado para centragem do pneu, d) execução da vulcanização com alta pressão e agregado o enxofre, d) vácuo para sucção dos condensados e extração do pneu, e) isométrica com o produto resultante.

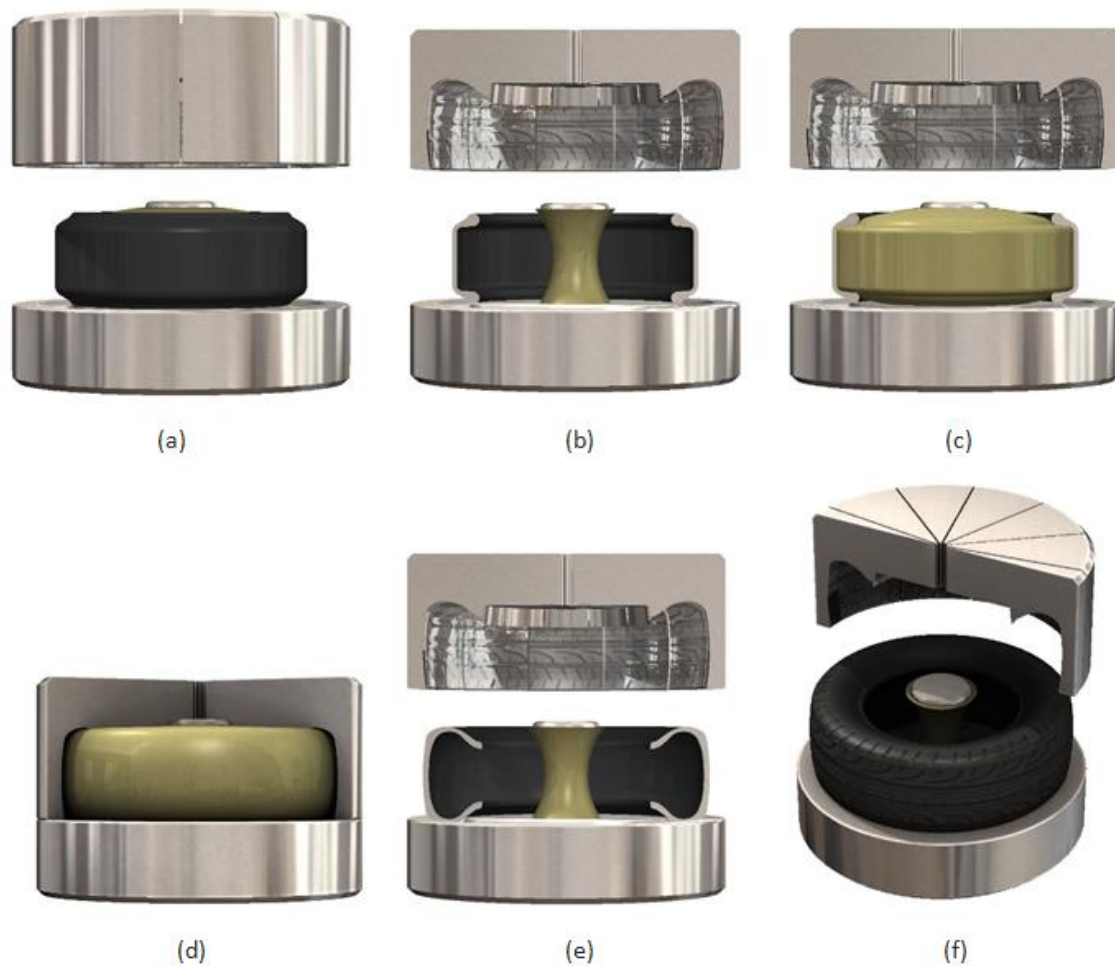


Figura 4 – Etapas do ciclo de vulcanização em prensa de cura.

Na Continental Mabor, as prensas de cura são de 13 diferentes modelos, cada qual possui duas cavidades, ou seja, realiza dois processos de vulcanização, sendo estes em simultâneo ou não. Tais máquinas estão distribuídas entre 10 canais, totalizando 269 prensas, e consequentemente 538 cavidades conforme a figura a seguir, onde estão representadas em preto as linhas de vácuo existentes, bem como as prensas em sua disposição atual, cada qual sinalizada por um quadrado em vermelho.

As prensas de cura presentes na unidade solicitam com pequenas variações, pressões entre -200 e -400 kPa assim sendo, conforme visto na Tabela 3 classificado como 'vácuo', coerente se levando em conta que seu objetivo é meramente contrair o diafragma e trazer consigo os rejeitos envolvidos. Na Figura 5 são representadas as linhas de vácuo e suas respectivas prensas.

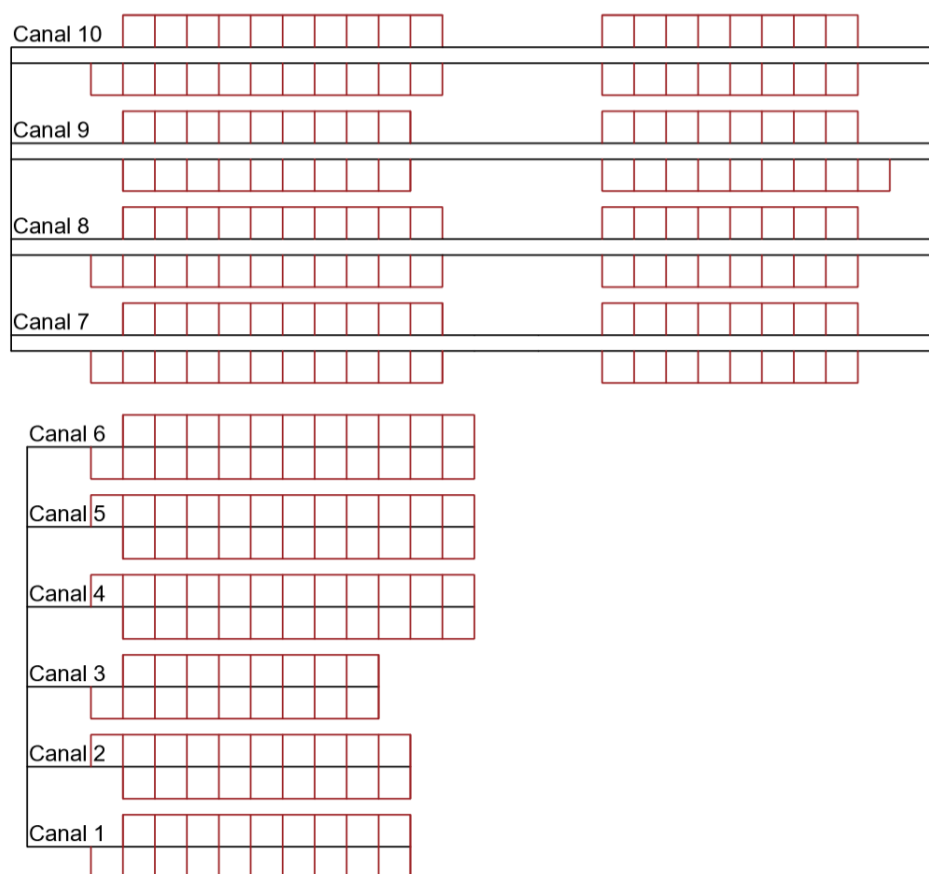


Figura 5 - Disposição das linhas de vácuo e prensas.

Para o sistema de vácuo, são utilizadas instalações com diversos componentes, destes, com enfoque na bomba de vácuo a qual protagoniza a estação, juntamente a válvulas que garantem seu funcionamento. Para a estação de vácuo abordada, existem algumas necessidades complementares e suplementares, devido a entrada de altas temperaturas, visando um sistema de águas de arrefecimento fechado, além de trazer resíduos condensados no sistema, assim manifestando exigência acerca da extração dos mesmos.

A nova estação deve suprir ao menos 150 prensas representadas na Figura 5, com os canais 8, 9 e 10. A estação, assim como o sistema fabril da Continental Mabor deve funcionar em todas as horas do dia e todos os dias na semana, com paradas ao decorrer do ano, mas o projeto deve ser realizado para regime permanente, com manutenções e casos de emergência previstos para que não ocorram perdas na produção em sua decorrência.

## 2.2 Instalação atual

A planta de vulcanização da fábrica Continetal Mabor, em sua instalação fabril conta com um total de 269 prensas, onde se pretende instalar uma nova estação de vácuo capaz de alimentar 150 destas para posterior expansão da capacidade de produção da unidade. Atualmente em sua grande maioria são alimentadas por uma única estação chamada VS1, futuramente responsável pelas secções adicionais, além da pequena estação designada para produções especiais e casos emergenciais. Representadas na Figura 6 as estações de vácuo por VS (*Vacuum Station*) tendo as prensas com coloração respectiva a estação de vácuo responsável pelas mesmas, a atuante (VS1) em verde, a nova estação (VS2) e enfoque do presente estudo em vermelho, outra para produções especiais e/ou casos de emergência (VS SOS) em azul, em amarelo as futuras prensas a serem instaladas e as linhas de vácuo que interligam todo o sistema, pontilhadas as ligações fechadas.

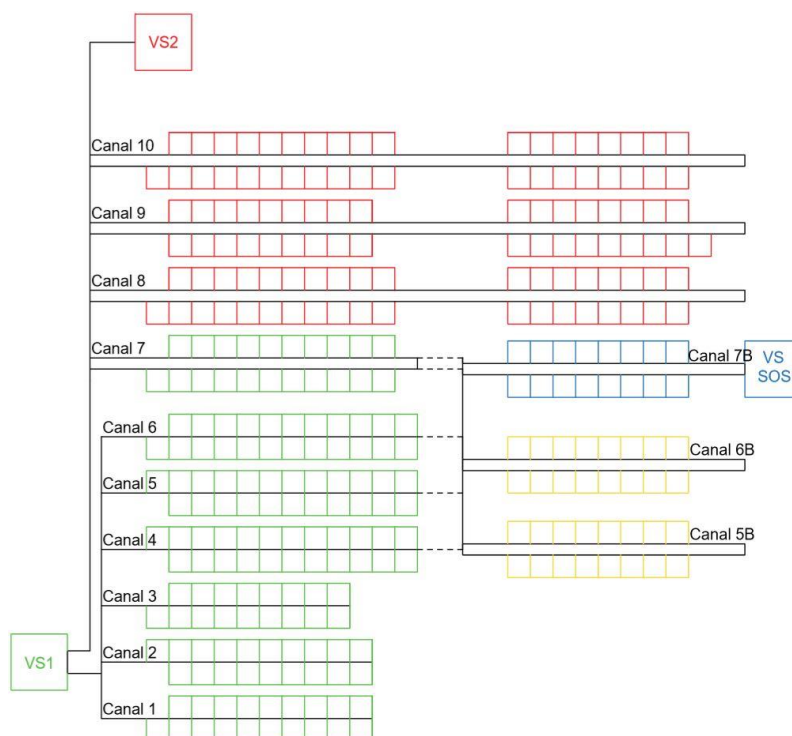


Figura 6 - Planta de Vulcanização por Estação de Vácuo.

As tubagens são conectadas para casos em que uma estação necessite suprir funcionamento incomum de outra e vice-versa. Para a primeira estação (VS1), da qual se baseará a nova instalação (VS2), se tem a disposição de componentes, elaborada como P&ID (Diagrama de tubulação e instrumentação) conforme Figura 7. Onde o canal principal admite o vácuo gerado, junto ao vapor saturado e os condensados gerados, direcionados a um tanque onde são separados os condensados e o ar húmido para arrefecimento, o qual é puxado pelas bombas enquanto os condensados são drenados para um tanque aberto, onde encontra novamente o ar e água rejeitados pelas bombas, posteriormente encaminhados para tratamento.

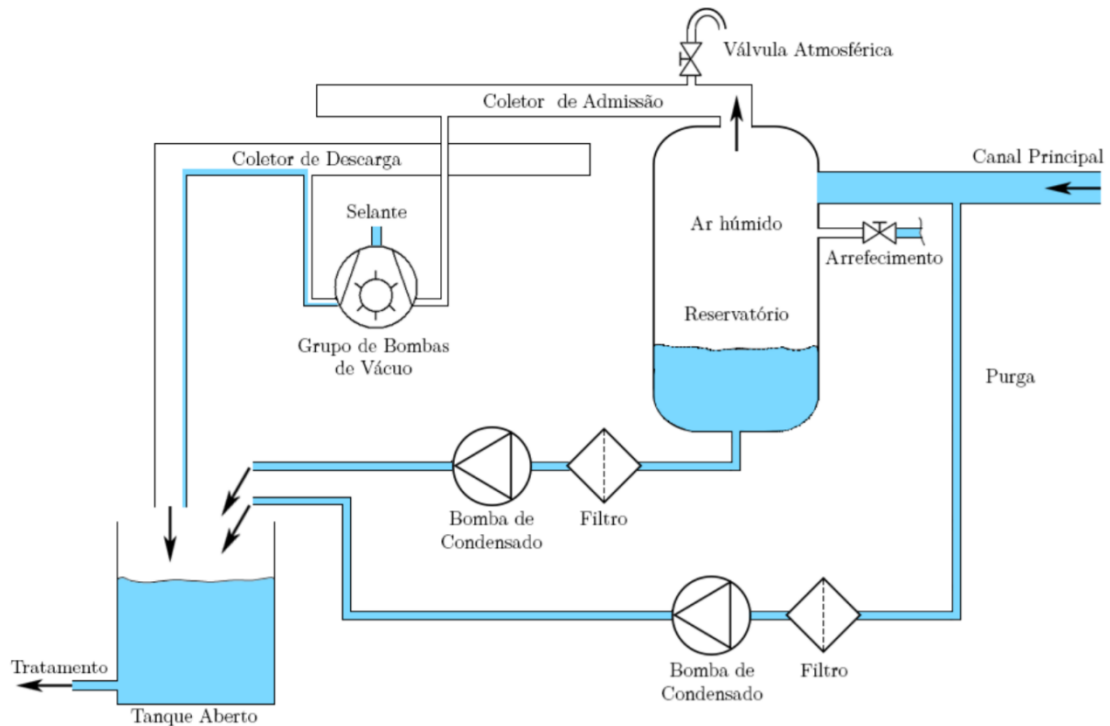


Figura 7 – P&ID de sistema de vácuo atual (Rafael et al. 2014).

A estação apresenta como componentes principais 8 bombas de vácuo em série, dois tanques de arrefecimento, tanque de alimentação de água para as bombas (abordadas posteriormente), e um grande tanque para as saídas de água aquecida e condensados. A nova estação visa fechar esse sistema aberto, criando um ciclo fechado das águas de arrefecimento e uma vez que separados os condensados, enviados diretamente para seu destino por bombagem.

### 2.3 Componentes da instalação

Se baseando em um sistema de vácuo, serão abordadas bombas de vácuo, bem como torres de arrefecimento para arrefecimento do vapor a entrada da estação, sistema de extração dos condensados agregados por meio de bombagem. São requeridas diversas válvulas a fim de um maior controle sob o sistema e manutenção da segurança em seu entorno. Sensoriamento de toda a estação com o objetivo de realizar monitoramento dinâmico, e em conjunto com as válvulas abordadas, buscar as condições ideais de operação.

Também prever obstáculos e limitações, assim definindo a melhor organização dos equipamentos, bem como análise perante toda a tubagem envolvida para determinação das perdas de carga, a fim de precisar a eficiência dos mesmos.

2.3.1 Bombas de vácuo

Protagonistas da estação abordada, as bombas de vácuo possuem diversos métodos de funcionamento, ainda divididos entre mecânicos, de vapor e fixação de gás, conforme Tabela 4. Sendo que a utilização de uma única bomba para atingir maiores demandas é sempre menos viável, é muito utilizado de grupos de bombeamento com bombas dispostas em paralelo para contornar esta problemática (Moutinho, A. M. C.; Silva, Maria Eugénia S. Froteira & Cunha 1980).

Tabela 4 – Tipos de Bombas de Vácuo.

Tipos de Bombas de Vácuo	Fixação	Fixação de Gás	Iônicas e de Adsorção
			Adsorção
			Absorção
			Criogênicas
	Transferência	Vapor	Difusão
			Ejetores de Vapor
		Mecânicas	Rotativas
			Anel Líquido
			Lóbulos
			Modulares

Como observado, são vários os tipos de funcionamento ainda com diferentes finalidades, sendo que destas algumas divergem do objetivo como fixação de gás que pode ser descartada, para filtragem de opções ainda existe a gama de atuação desses mecanismos, conforme descrito na Figura 8.

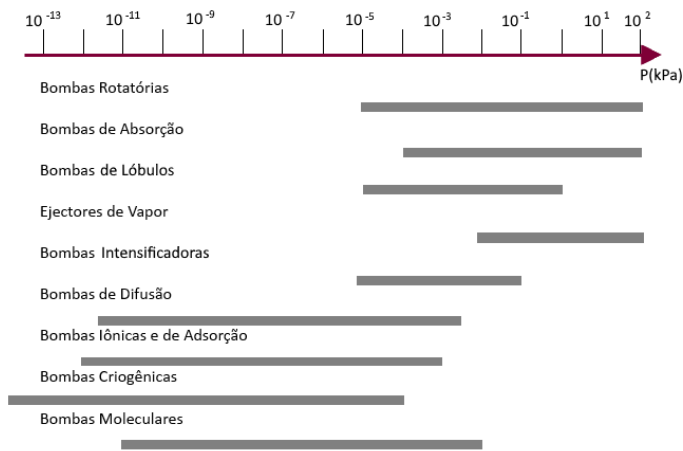


Figura 8 - Zonas de pressão abrangidas por tipo de bomba. (Adaptado de Tecnologia de Vácuo)



Segundo os requisitos das prensas abordadas, o sistema deve suprir entre 0 e 100 kPa, isto é, perante ao gráfico apresentado na Figura 8, abrangendo a faixa de 100 kPa, seriam estas as bombas rotativas, de absorção e de vapor, sendo que fixação de gás fora descartada. Atualmente na estação VS1 estão implantadas bombas de vácuo mecânicas do tipo anel de água, as quais se assemelham as rotatórias, porém a partir de 1mbar sendo assim coerentes com a gama vista.

#### 2.3.1.1 Bombas de anel d'água

As bombas de anel d'água, também chamadas por bombas de anel líquido, e classificadas bombas de vácuo mecânicas, tem sua vedação executada pela água. Tendo como componentes um rotor de palhetas múltiplas excêntrico no interior de uma carcaça com suas folgas projetadas. Em funcionamento esse conjunto realiza a compressão dos gases conforme a Figura 9.

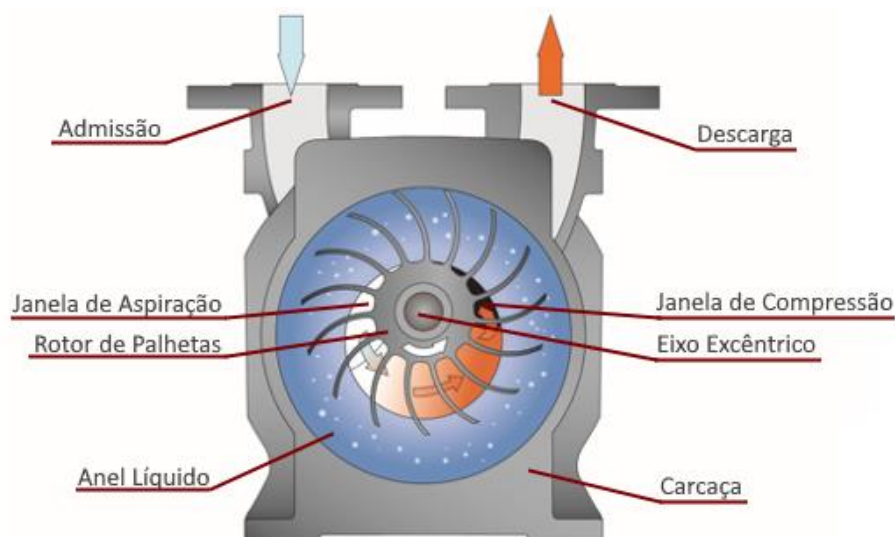


Figura 9 - Bomba de anel líquido, adaptado de (Busch Bombas e Sistemas de Vácuo Brasil).

O conjunto atua de uma forma em que, uma placa delimita as janelas de aspiração e compressão fixamente, enquanto o eixo excêntrico faz seu movimento, ao expandir novamente o volume entre palhetas e o anel líquido (após compressão e descarga de ar), gera uma grande queda de pressão nas células presentes, assim gerando o vácuo que é posteriormente descarregado sob pressão pelo mesmo volume sendo que desta vez comprimindo o volume abordado.

O anel líquido (formado por água) tem como função além da vedação a de arrefecimento, sendo que esta melhora o desempenho da bomba ao incrementar sua pressão final, assim sendo o equipamento pode ser continuamente alimentada por água fria a fim de manter seus limites de pressão (Moutinho, A. M. C.; Silva, Maria Eugénia S. Froteira & Cunha 1980).

### 2.3.2 Permutadores de calor

Permutadores de calor são sistemas que promovem a interação térmica entre dois ou mais fluidos, sob diferentes temperaturas. São classificados como recuperadores e/ou regeneradores, processos de transferência: contato direto ou contato indireto, geometria de construção: tubos, placas, e superfícies extendidas, mecanismos de transferência de calor: fase simples ou fase composta, disposição do fluxo: paralelo, contra ou cruzado (Kakaç, Liu, and Pramuanjaroenkij 2012), conforme Figura 10.

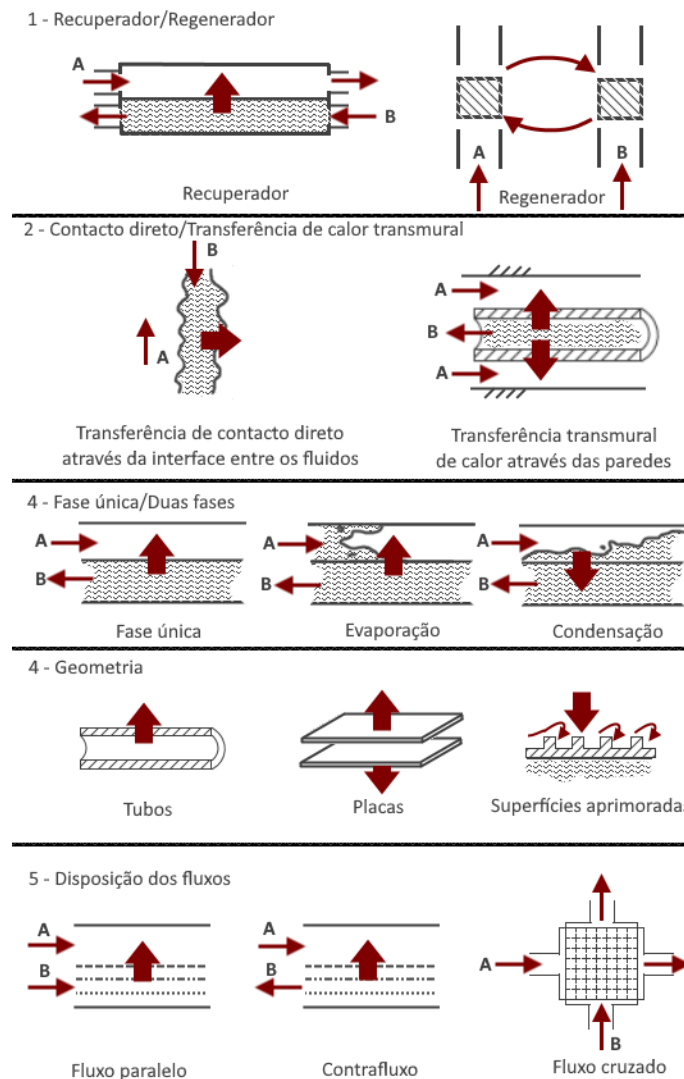


Figura 10 Critérios utilizados na classificação de permutadores de calor, adaptado de (Heat Exchangers).

Sendo que na indústria se enfoca para torres de arrefecimento, destiladores e recuperadores de calor da água (Kakaç et al. 2012), o estudo se dará acerca de torres de arrefecimento, pois em âmbito industrial é o que se enquadra na finalidade do projeto, tendo ainda muitas das possibilidades apresentadas na Figura 10.

### 2.3.2.1 Permutadores de carcaça e tubos

Constituídos por um casco cilíndrico preenchido por tubos paralelos por onde o fluido principal escoar, tendo um caminho mais longo entre o fluido de arrefecimento nesse caso, o qual entra em contato com a superfície externa do tubo tendo mais área de contato para sua troca de calor, ainda podendo conter obstáculos aumentando o caminho a ser percorrido por este fluido dentro da carcaça. Os tubos onde o fluido principal escoar podem possuir diversas variantes, como disposição, diâmetros, espessura de paredes, material e ainda variando entre alguns arranjos internos que alteram o percurso dos fluidos e sua eficiência, isso somado a parâmetros da carcaça fazem parte de seu dimensionamento.

A seguir, na Figura 11 se tem um diagrama de permutadores de calor do tipo carcaça e tubos com passagem única, onde vermelho e azul representam o fluido principal aquecido e resfriado respectivamente enquanto em roxo a transição entre estes, e em verde o fluido de arrefecimento com seu percurso prolongado por chapas verticais em branco, também chamadas por chicanas. Suas orientações definidas por entrada a quente e saída a frio, definindo assim um processo de arrefecimento, e o fluido de arrefecimento ainda pode ser realizada por ambos os sentidos, necessitando estudo conforme sua eficiência.

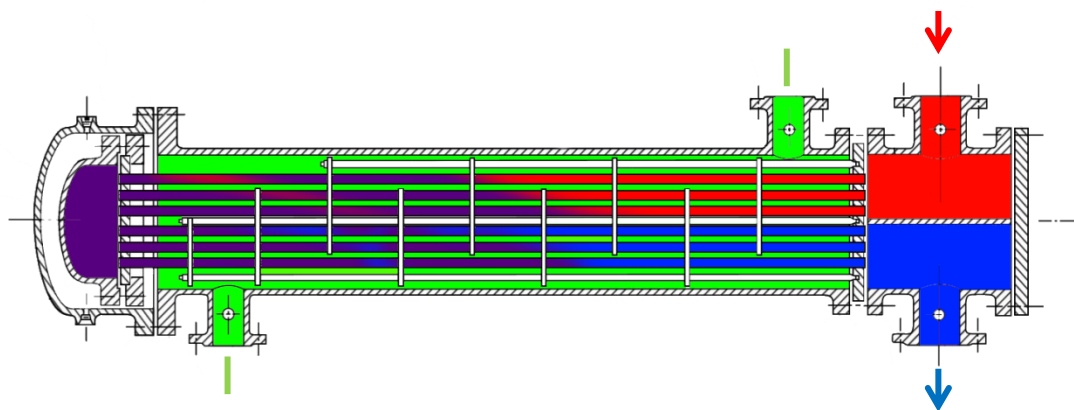


Figura 11 - Permutador do tipo carcaça e tubos.

### 2.3.3 Tubagens

As tubagens são suma importância, tendo que em uma instalação industrial, o projeto de tubulações chega a atingir de 45 a 60% do total de homens-hora gastos em todo o projeto global (Telles 2012). Normatizado pela ASTM conforme material e processo de fabricação enquanto pela ASME em relação à designação de espessura dos tubos, destas serão relevantes por delimitarem propriedades e composição do material aplicado, são as seguintes:

ASTM A0106, Tubos em aço carbono calado, utilizados em linhas de condução de vapor para altas temperaturas e em coletores de caldeiras, não costurados e nas bitolas entre 1/8 até 26 polegadas;

ASTM A0240, Tubos de aço inoxidável para tubos e vasos de pressão para aplicação geral;

ASME/ANSI B36.10M, trás consigo uma designação para o número de série dos tubos chamado *Schedule*, o qual pode ser obtido através da seguinte equação (Telles 2012):

$$Sch = \frac{1000.P}{\sigma} \quad (1)$$

Donde se utiliza tensão admissível do material ( $\sigma$ ) e pressão interna de trabalho no tubo ( $P$ ) nas unidades N/mm<sup>2</sup> e MPa respetivamente.

A disposição dos tubos é um critério a ser determinada previamente a construção da galeria, tanto para delimitação de espaços e posicionamentos na galeria principal, quanto para definição do corredor de ligação e suas respectivas escavações sendo estes subterrâneos. Como protagonista a instalação terá o tubo de vácuo tornando este o principal, seguido por águas de arrefecimento e extração de condensados, além de ar comprimido e água de limpeza para a sala.

#### 2.3.3.1 Conexões

As conexões de tubos são executadas nas extremidades de sistemas, desvio de direção da tubulação, ou simplesmente dar continuidade a seu percurso unindo 2 ou mais tubos. Processos de ligação são a forma com que se une tubagem e acessórios entre si, classificadas entre permanentes e não permanentes sendo que destes são 5 os principais processos aplicados a tubos de aço (APTA), conforme Figura 12.

- Ligações roscadas (a) – Conectado através de superfície roscada normatizada, podendo esta ser cilíndrica ou cônica e se enquadra em permanente ou não permanente dependendo da aplicação;
- Ligações Soldadas (b) – Permanente e com mínimo desvio na superfície interna;
- Ligações ranhuradas (c) – Não permanente e respectivo ao relevo na superfície externa dos tubos, onde acomoda um conjunto de componentes que realizam a ligação;
- Ligações por compressão (d) – Permanente, realizada por rosca até o DN65 e por flanges a partir do DN80, onde em ambos uma junta elastométrica cria a zona de estanquidade e uma anilha garante que seja de forma uniforme.
- Ligações flangeadas (e) – Mais comuns na indústria, como não permanentes e de fácil acoplamento/desacoplamento (APTA).

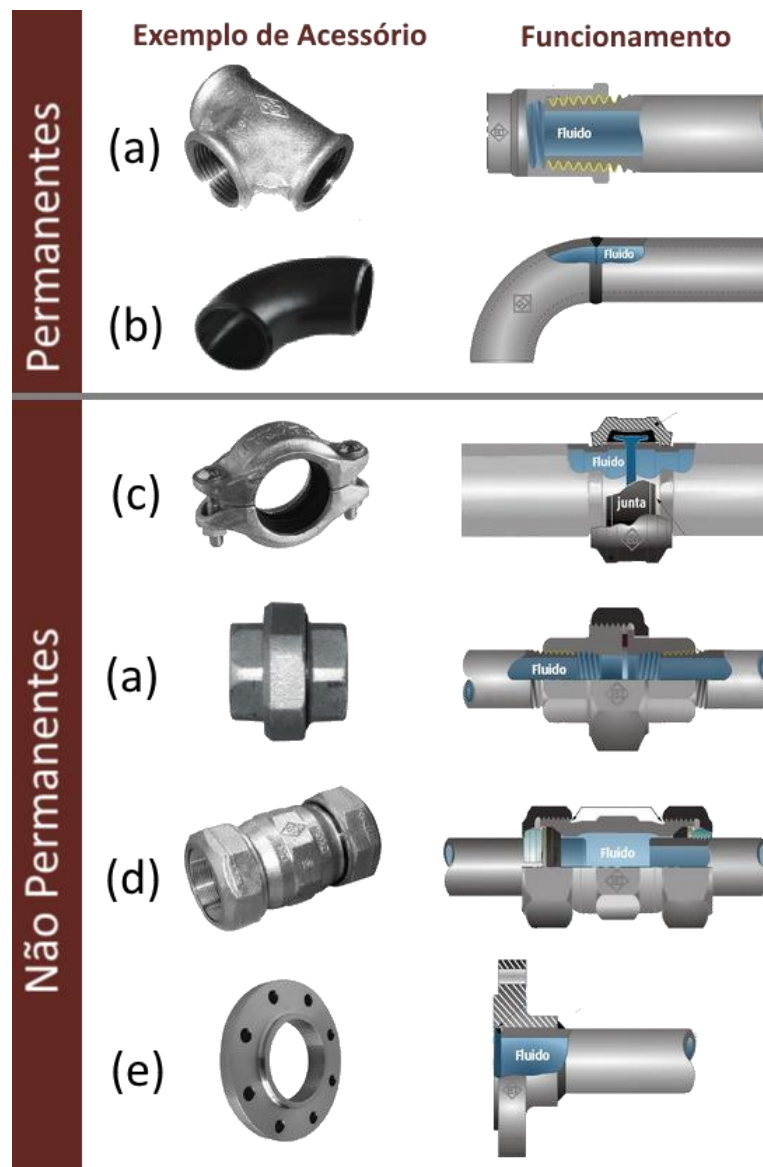


Figura 12 – Processos de ligação, adaptado de (APTA).

### 2.3.3.2 Perdas de carga

O principal fator a ser estudado para projetos em relação a tubagens são as perdas de carga, pois as linhas entre um ponto e outro sofrem alterações em seus parâmetros como pressão e temperatura. O objetivo é minimizar estas variáveis ao máximo, reduzindo perdas de energia, vibrações e níveis de ruído, para obtenção de um sistema mais controlado, além de alcançar um custo menor de bombagens extraindo maior eficiência dos equipamentos envolvidos.

Para tubulações, a perda de carga localizada é calculada pela Equação 2.

$$h_p = K_s \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

(Munson, Young, and Okiishi 2006)

Sendo que para  $K_S$ , se adotam os valores de coeficientes de perdas de carga localizadas, presentes na

Tabela 5 respectiva aos acessórios encontrados na Figura 13:

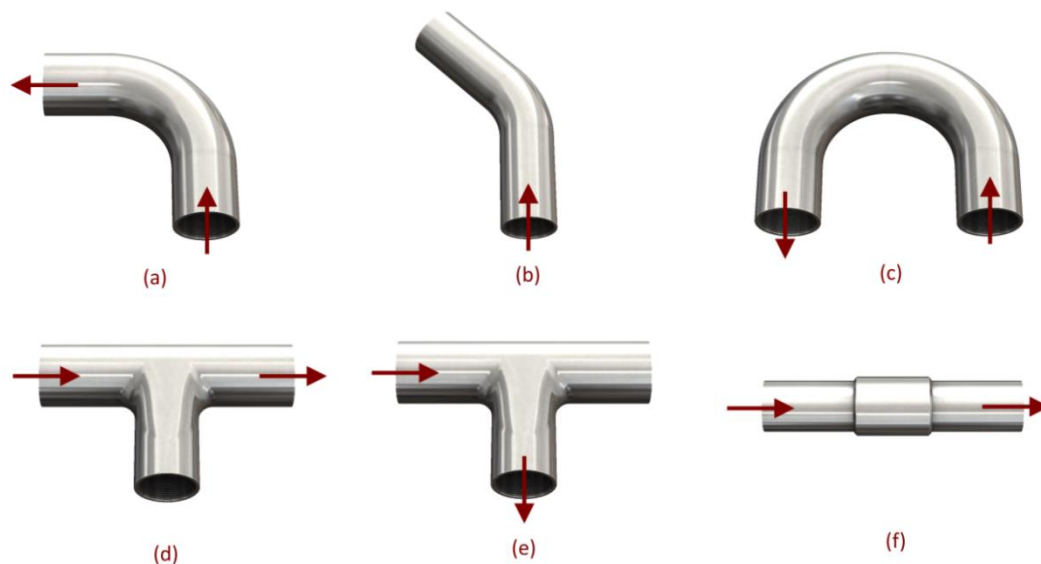


Figura 13 - Acessórios de tubagens (a) curva 90°, (b) curva 45°, (c) Retorno 180°, (d) Tê escoamento linear, (e) Tê escoamento entroncado, (f) União rosçada.

Tabela 5 – Perdas de carga por acessório, adaptado de (Munson et al. 2006).

Componente	$K_S$
<b>Curvas</b>	
Normal 90°, flangeado	0,3
Normal 90°, rosado	1,5
Raio longo 90°, rosado	0,2
Raio longo 90°, rosado	0,7
Raio longo 45°, flangeado	0,2
Normal 45°, rosado	0,4
<b>Retornos 180°</b>	
Retorno 180°, flangeado	0,2
Retorno 180°, rosado	1,5
<b>Tês</b>	
Escoamento linear, flangeado	0,2
Escoamento linear, rosado	0,9
Escoamento entroncado, flangeado	1,0
Escoamento entroncado, rosado	2,0

Tabela 5 (Continuação) – Perdas de Carga por Acessório, adaptado de (Munson et al. 2006).

<b>Componente</b>	<b><math>K_s</math></b>
<b>União, roscada</b>	0,08
<b>Válvulas</b>	
Globo, completamente aberta	10
Angular, completamente aberta	2
Gaveta, completamente aberta	0,15
Gaveta, $\frac{1}{4}$ fechada	0,26
Gaveta, $\frac{1}{2}$ fechada	2,1
Gaveta, $\frac{3}{4}$ fechada	17
Retenção, direção do escoamento	2
Retenção, contra escoamento	$\infty$
Esfera, completamente aberta	0,05
Esfera, $\frac{1}{3}$ fechada	5,5
Esfera, $\frac{2}{3}$ fechada	210

#### 2.3.4 Bomba de condensados

Tendo em vista um grande fluxo de condensados consequentes do processo abordado, acaba se tornando necessária a extração e tratamento dos mesmos, visto que chegam em altas temperaturas e não devem prosseguir no sistema, podendo danificar os componentes seguintes ao tanque inicial, estando este sob ação de vácuo, ou seja, para extração será necessária uma bomba de condensados com potência para alcançar o próximo ponto, ainda incrementada com potência para vencer o vácuo no reservatório.

Todos os condensados, juntamente a sujeira presente no sistema, devem chegar até o *blowdown* com altura superior a 1,8m por gravidade, caso o sistema de bombagem apresente falha os condensados continuam chegando até o destino sem interrupções até que haja a resolução da linha principal.

As bombas instaladas na primeira estação são dos modelos SPIRAX SARCO MFP14 e GRUNDFOS NB 40-125/142, representadas na Figura 14, donde 4 são do primeiro tipo e 1 do segundo, sendo a unitária de emergência caso as demais fiquem indisponíveis. Estes são os principais modelos utilizados na unidade atualmente, geralmente ainda acoplados a um sistema redundante, onde uma bomba é ligada a outra, e em caso de falha ou manutenção fica outra de prontidão para seguir o processo normalmente.



Figura 14 – Bombas de condensados SPIRAX (esquerda) e GRUNDFOS (direita) (“Spirax Sarco”), (NB, NBE).

O modelo SPIRAX é alimentado por ar comprimido e funciona a base de diferenciais de pressões dentro de sua cavidade, enquanto a GRUNDFOS parte de um acoplamento a motor elétrico donde suas pás internas se encarregam de conduzir o fluxo a partir do torque gerado por tal.

O principal parâmetro a ser observado para uma bomba de condensados é sua altura manométrica, o que corresponde à pressão que esta é capaz de gerar para movimentar o fluido abordado, esta ainda varia conforme o caudal e consequentemente a velocidade de escoamento na tubagem. A pressão a ser vencida pela bomba consiste na diferença de coluna de água entre altura de entrada e saída da tubagem, agregada aos valores de perda de carga desta, tanto linearmente quanto via acessórios acoplados em sua trajetória entre este percurso. Algumas destas bombas dependendo de suas características construtivas, ainda possuem capacidade de transportar um certo teor de particulados, ou seja resíduos sólidos em meio ao fluido principal, dependendo de sua aplicação e necessidade do processo em que esta se encontra instalada.

### 2.3.5 Válvulas

As válvulas de uma estação de sistema de vácuo desempenham papéis fundamentais para com seu funcionamento, cada qual com sua diferente funcionalidade conforme listado em relação aos tipos de válvulas na Tabela 6, as quais serão afixadas à tubulação por meio de flanges, ou anexas a um reservatório do sistema. Estas serão responsáveis por controlar e ajustar o funcionamento, proporcionando regulação de caudais e permitindo alternar o fornecimento de fluido. Estas serão posicionadas essencialmente nas entradas e saídas dos componentes efetuando diversas funções críticas para seus funcionamentos.



Tabela 6 – Finalidade e principais válvulas, adaptado de (Telles 2012).

Função da válvula	Tipos de válvulas
Bloquear o fluxo (aberto/fechado)	Válvulas de gaveta Válvulas de macho Válvulas de esfera Válvulas de comporta
Regulagem	Válvulas de globo Válvulas de agulha Válvulas de controle Válvulas de borboleta Válvulas de diafragma
Fluxo em sentido único	Válvulas de retenção Válvulas de retenção e fechamento Válvulas de pé
Controlar pressão montante	Válvulas de segurança e de alívio Válvulas de excesso de vazão Válvulas de contrapressão
Controlar pressão jusante	Válvulas redutoras e reguladoras de pressão Válvulas de quebra-vácuo

Também denominadas válvulas solenóides, as válvulas com função de bloquear o fluxo tem por objetivo meramente alternar entre bloquear por completo a passagem do fluido ou liberar integralmente a passagem deste. Esta é representada na Figura 15.

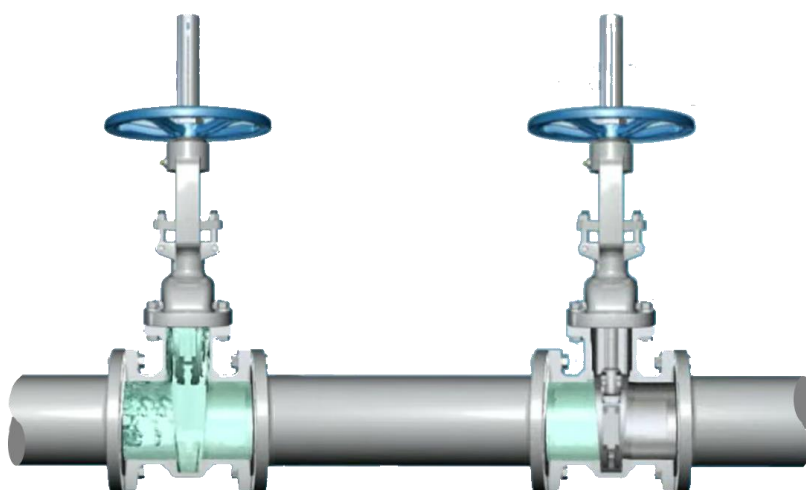


Figura 15 - Exemplo de válvula de bloqueio de comporta aberta (esquerda) e fechada (direita), adaptado de ("FBV").

As de regulação visam controle do escoamento podendo assim limitar a passagem do mesmo, e muito embora as de borboleta e diafragma são essencialmente de regulação, também possuem a função de bloqueio (Telles 2012), como expresso na Figura 16 com uma do tipo globo:



Figura 16 - Exemplo de válvula de regulação de globo aberta (esquerda), parcialmente aberta (centro) e fechada (direita), adaptado de ("FBV").

Além das diversas funcionalidades e meios de funcionamento, as válvulas ainda se diferem pelo meio de operação, podendo este ser manual, motorizado ou automático, bem como seu meio de acionamento seccionado pelas anteriores, conforme Tabela 7:

Tabela 7 – Meios de operação das válvulas, adaptado de (Telles 2012).

Operação	Meio
Manual	Volante
	Alavanca
	Engrenagens, parafusos sem-fim, etc...
Motorizada	Pneumática
	Hidráulica
	Elétrica
Automática	Próprio fluido (diferença de pressões gerada pelo escoamento)
	Molas ou contrapesos

Nos já existentes sistemas da empresa, há válvulas acopladas por flanges, sendo estas posicionadas nas extremidades do sistema com acionamento manual, e válvulas intermediárias de acionamento pneumático com aplicação de ar comprimido.

## 2.4 Monitoramento

O monitoramento do sistema se faz crucial para o funcionamento da estação, tanto para operação quanto manutenção dos equipamentos, tendo em vista que estará em funcionamento 24h/dia.

As estações atuais presentes nas instalações da Continental Mabor apresentam monitoramento principalmente perante temperaturas, caudais e pressões em diversos pontos do sistema, além de interface podendo controlar válvulas chave presentes no processo.

Deverá ser instalada uma central de monitoramento nas proximidades da estação, pelo nível térreo, interligado com diversos pontos de sensoriamento, bem como controle das válvulas de operação motorizada.

O Controle PID, ou Proporcional Integral Derivativo é um método de controle sistêmico programado, o qual é capaz de dinamicamente ajustar seus parâmetros, acionar e alterar como, por exemplo, a entrada de fluido para o sistema ou então interceptar um processo por sobrecarga, de acordo com os parâmetros predefinidos pelo operador fazer com que toda a estação se adeque harmonicamente até atingir os mesmos. Associado a toda a parte de sensoriamento, a central de controle PID recebe todas as informações obtidas por seus componentes e então pode ser operado por sua interface, podendo o operador alterar algum parâmetro ou então visualizar quando algo atípico decorrer em determinado processo.

Temperatura – Chamados termopares, são os dispositivos responsáveis pela captura das temperaturas envolvidas no processo, geralmente no meio industrial se tem o corpo embutido ao interior de uma câmara ou então agregado a uma superfície, com diversos métodos de funcionamento, tem como saída um par de fios responsáveis por transmitir as informações obtidas relativas à temperatura em sua extremidade, conectado a uma central de controle. Um equipamento do tipo termopar está representado na Figura 17.



Figura 17 – Termopar industrial ("Endress+Hauser").

Este dispositivo tem sua haste inserida no meio donde se deseja obter a temperatura e é capaz de transmitir informação usualmente para uma central computadorizada capaz de interpretar os dados obtidos, os termopares possuem diferentes tipos de construção bem como diferentes gamas de leitura divergindo entre si.

Caudalímetros – Capazes de determinar os caudais volúnicos a atravessarem sua cavidade, em alguns equipamentos ainda capazes de captar junto a temperatura em que os mesmos atravessam, é um dispositivo acoplado a tubulação essencial para o monitoramento, pois ao posicionar um a entrada do sistema, e outro a saída, é possível verificar irregularidades de funcionamento além de observar casos de sobrecarga, ou então meramente aferir seu desenvolvimento em funcionamento nominal. Um equipamento de mesmo modelo aos utilizados em outras estações está representado na Figura 18.



Figura 18 – Caudalímetro (‘Endress+Hauser’).

Pressão – As coletas de pressão são essenciais, principalmente quando se entratando de uma estação de sistema de vácuo, sendo este seu principal parâmetro e objetivo de um sistema responsável por criar esse decréscimo de pressão para funcionamento das prensas. Associado a leitura dos caudalímetros, é possível calcular as demais propriedades do escoamento, assim precisando funcionamento e análises da estação em um todo. Um equipamento do tipo manômetro semelhante aos utilizados em outras estações está representado na Figura 19.



Figura 19 – Manômetro industrial (‘Endress+Hauser’).

## 2.5 Instalação industrial

A Continetal Mabor possui equipe de engenharia civil, a qual responsável pelo projeto da galeria subterrânea, bem como supervisão da execução, tal e qual se mostrou receptiva e dinâmica, acarretando em um processo iterativo e interativo em relação informações e requisitos em torno do projeto, assim contornando obstáculos que surgiam de ambos os lados, com alternativas até se alcançar um resultado.

Dentro das diversas unidades da empresa, são também aplicadas normas internas a fim de alcançar uma certa padronização entre as instalações, neste caso, se utiliza o MES (Machine and Equipment Standard), secção presente como Anexo 1, o qual dita algumas limitações e padronizações especificamente voltados a instalações de sistemas de vácuo. Padronizações estas correspondem a requisitos referentes desde proteções metálicas até condições ideais e mínimas para escadas (Dimensionamento de escadas), bem como corredores e espaços de manutenção, garantindo acessibilidade a todos os componentes e prevendo acesso a possíveis substituições destes (MES).

A estação será instalada no nível subterrâneo, seguindo o padrão das demais além de adaptação a tubagens todas dispostas no subsolo, implicando assim na escavação de uma galeria sendo esta disposta nas proximidades do canal 10, esquematizado na Figura 6, qualquer interface entre com o piso térreo como escadas que envolvam aberturas neste, devem ser localizadas na área hachurada conforme representado na Figura 20, onde os corredores superiores estão representados em preto enquanto o corredor subterrâneo já existente está representado em verde, às prensas em vermelho e suas linhas de vácuo existentes em amarelo.

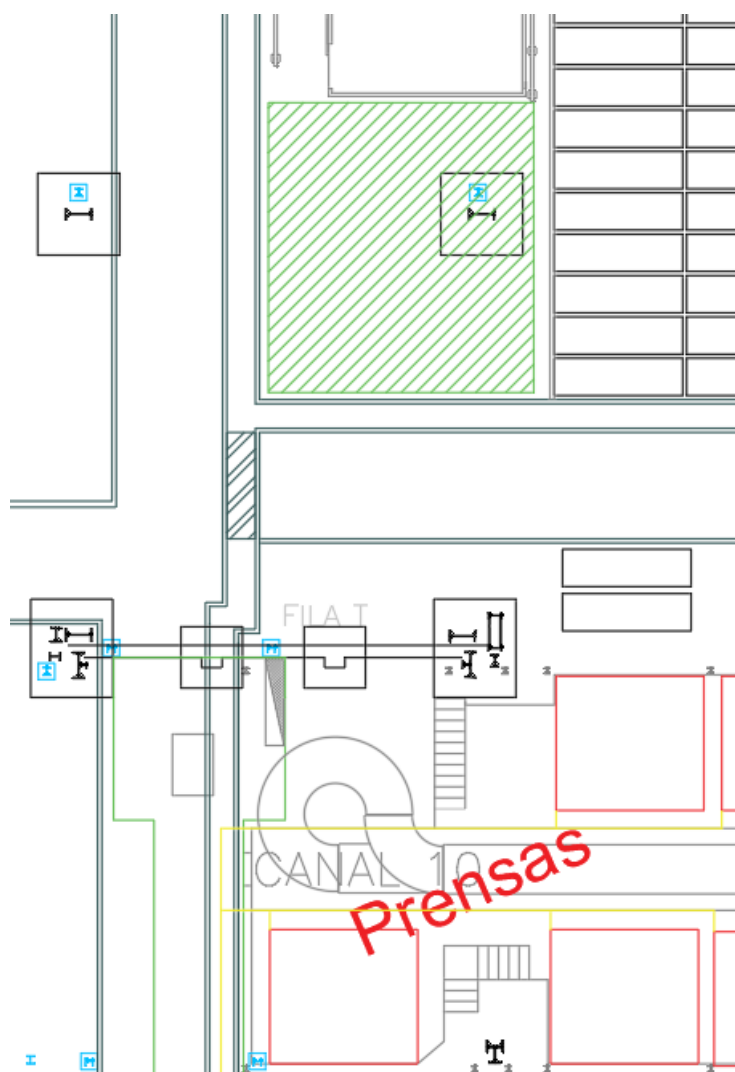


Figura 20 – Planta da Região de instalação: área hachurada a destinada a conexões entre piso inferior e superior próximo ao corredor de prensas.

# METODOLOGIA

- 4.1 Espaço da instalação
- 4.2 Condições de entrada
- 4.3 Tubagens
- 4.4 Seleção de bombas
- 4.5 Dimensionamento dos permutadores
- 4.6 Tanques
- 4.7 Adequações da empresa
- 4.8 Diagrama da estação
- 4.9 Desenho 3D da estação





### 3 METODOLOGIA

Este trabalho por se tratar de uma abordagem de projeto, trouxe consigo a necessidade da definição de uma metodologia a ser seguida de forma a estabelecer uma ordem e padrão de trabalho. Uma diferente abordagem fora definida para cada setor em âmbito de projeto compreendido na estação.

Os dimensionamentos serão feitos a partir de pré-cálculos estipulados e posteriormente submetidos a refinamentos, até que satisfeita a condição pré-estabelecida. Desta forma tende a entrar em um ciclo, este fora elaborado e expresso em um fluxograma, efetuado com auxílio da aplicação *web* LucidChart, e este é apresentado na Figura 21.

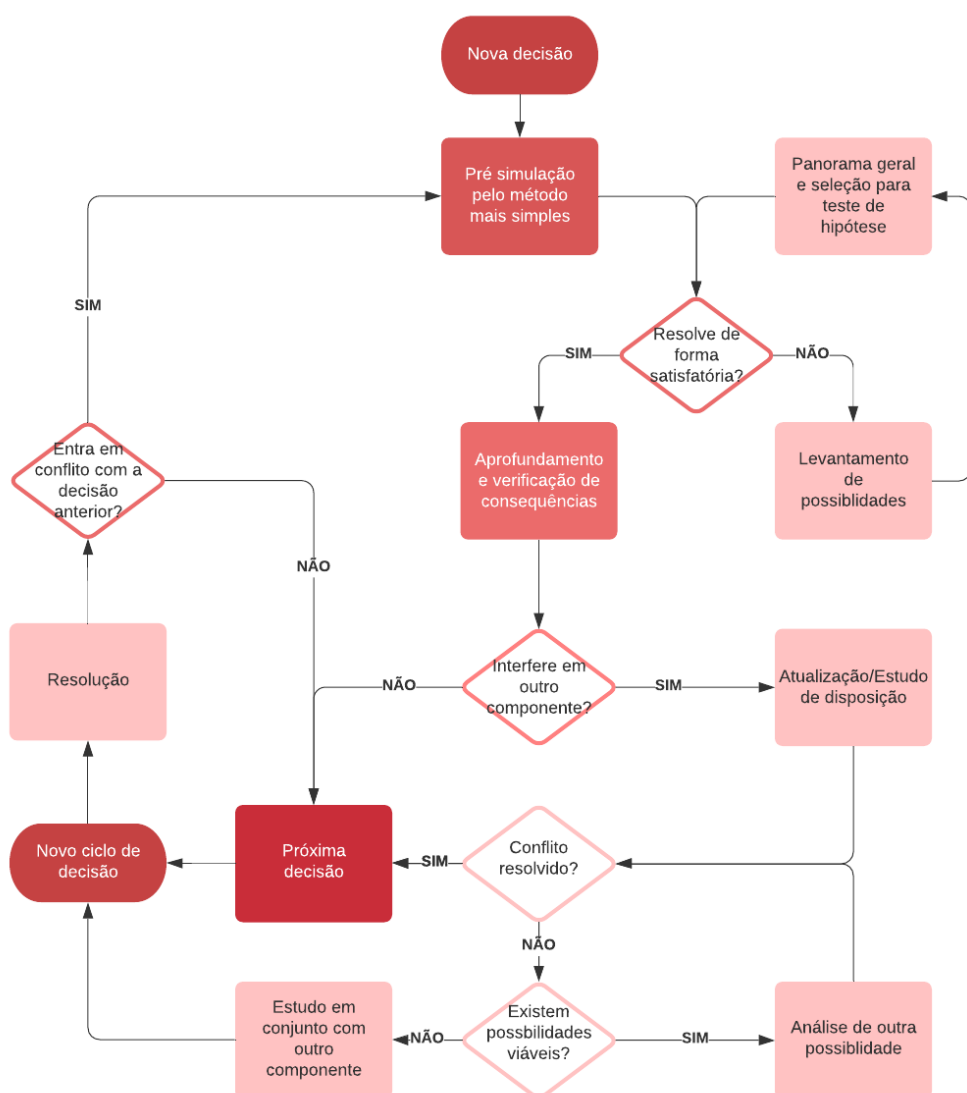


Figura 21 - Fluxograma metodológico para projeto.

Este fluxograma será adotado em todo o desenvolvimento deste trabalho, sendo mais bem aplicado aos dimensionamentos, donde consiste que para cada abordagem será realizada uma estipulação ou um pré-cálculo, visando uma maior abrangência do sistema em tempo hábil. Esta hipótese será submetida a um aprofundamento, caso validado passa para a próxima etapa, pelo contrário será analisada uma diferente possibilidade, a qual deve ser submetida ao mesmo processo. Posteriormente a possibilidade afirmada é questionada novamente, em relação a visão geral do sistema, caso validada, esta é finalmente confirmada. Ao fim do processo ainda caso outra futura decisão influencie noutras, é possível volatilizar as já consolidadas. Este fluxograma tem como principal objetivo gerar um sistema de decisões dinâmicas e envolvendo um panorama geral de todo o sistema, decisivo essencialmente para definição de disposição e espaço.

### 3.1 Espaço

A medição do espaço já existente será definida pela média entre aferições coletadas de forma direta entre quatro amostras, duas utilizando fita métrica e outras duas com medição a laser. Devido a certa tolerância de erro neste ponto, as medições não serão tratadas, muitas das quais não serão expostas no relatório por questões de confidencialidade.

Posteriormente, para escavação da nova galeria e definição dos espaços úteis, se obteve auxílio da equipe de engenharia civil interna da empresa, onde haverá uma comunicação mútua buscando o equilíbrio entre necessidades e requisitos de ambos os lados. Neste ponto a aplicação de trabalho será o AutoCAD da empresa Autodesk, o qual é amplamente utilizado dentro da empresa.

A fim de alcançar o espaço disponível final, será inicialmente proposto seguindo a instalação mais recente entre as unidades da empresa, posteriormente visto os espaços essenciais, requisitos de manutenção e normativos do espaço industrial. Findando com a disposição final compactado e proposto o espaço mínimo abrangendo todos os componentes e pareceres vindos da equipe de engenharia civil.

A definição do espaço necessário possui necessidade de urgência, uma vez que esta tem prazo limitado para ser executada, sendo este dentre uma paragem das instalações da Continental. Assim sendo, este será o primeiro ponto abordado.

### 3.2 Condições de entrada

As entradas e saídas do sistema são o ponto de partida do sistema, uma vez que é necessário o dimensionamento dos componentes envolvidos. A precisa determinação destes é crucial para o andamento do estudo, assim sendo serão localizadas informações dentro da empresa, uma vez que águas de arrefecimento tem fonte conhecida e controlada.

O vácuo será estimado a partir do cálculo de suas propriedades, localizado ponto a ponto em seu desenvolvimento para uma maior precisão da estimativa. Os dados obtidos nesta etapa são cruciais, deste modo deverão ser realizadas confirmações analíticas a fim de evitar equívocos nesta e em posteriores etapas, uma vez que as demais são dependentes. Nesta etapa ainda serão desconsideradas as perdas de carga envolvidas na logística até a estação

### 3.3 Permutadores

Os permutadores serão dimensionados partindo da norma TEMA (*Tubular Heat Exchanger Manufacturers Association*), e seguindo orientações extraídas da bibliografia *Heat Exchangers* (Kakaç et al. 2012). Definidas as condições de entrada, passando ainda por três etapas: Pré-dimensionamento, Revisão e Dimensionamento.

No pré-dimensionamento, será atingido o projeto base a partir das entradas pré-estipuladas. Na fase de revisão, serão revistas as entradas em visão global da estação, e corrigidas perdas de carga. Por fim, se conclui com valores finais obtidos na fase do dimensionamento, solidificando os parâmetros dos equipamentos abordados.

#### 3.3.1 Pré-dimensionamento dos permutadores

Os pré-dimensionamentos partirão da diferença de temperaturas, uma vez que estas serão os objetivos iniciais a serem estipulados, servindo assim de base para os cálculos subsequentes.

##### 3.3.1.1 Diferenças de temperaturas

O diferencial médio de temperaturas logarítmicas pode ser determinado pela Equação 3 e Equação 4, no caso de corrente paralela e contra-corrente respectivamente.

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{q0} - T_{f0}) - (T_{q1} - T_{f1})}{\ln \frac{(T_{q0} - T_{f0})}{(T_{q1} - T_{f1})}} \quad (3)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{q0} - T_{f1}) - (T_{q1} - T_{f0})}{\ln \frac{(T_{q0} - T_{f1})}{(T_{q1} - T_{f0})}} \quad (4)$$

Esta diferença se dá pelo desenvolvimento das temperaturas no interior do permutador, como está representado na Figura 22.

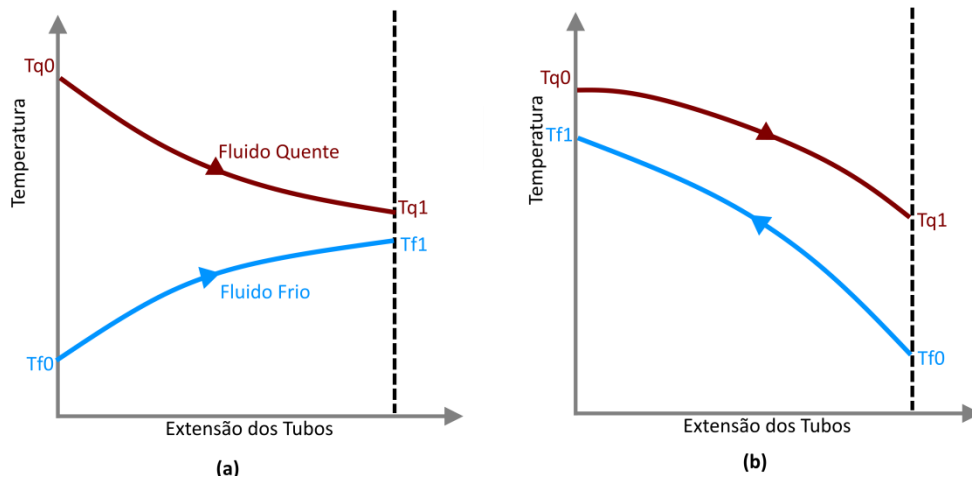


Figura 22 - Diferenças de temperaturas ao longo do tubo para os fluxos: (a) paralelo e (b) contracorrente.

Depois de encontrado, caso seja um permutador de fluxo cruzado e/ou de múltiplas passagens, este diferencial ainda necessita de uma correção de acordo com a configuração de passagens pelo fator de correção (F), que por sua vez é obtido graficamente. Para casos de permutadores simples de passagem única o fator equivale a 1, ou seja, não é necessária correção para o  $\Delta T_{ln}$  encontrado.

Os gráficos de configurações de cruzamento de fluxo e passes estão apresentados no ANEXO 2. O valor de correção pode ser encontrado pelo cruzamento gráfico dos parâmetros P e R resultantes da relação de temperaturas, as quais são expressas pela Equação 5 e Equação 6 respectivamente.

$$P = \frac{T_{f1} - T_{f0}}{T_{q0} - T_{f0}} = \frac{\Delta T_f}{\Delta T_{max}} \quad (5)$$

$$R = \frac{T_{q0} - T_{q1}}{T_{f1} - T_{f0}} \quad (6)$$

### 3.3.1.2 Parâmetros geométricos

Nesta etapa serão determinados parâmetros como diâmetro e comprimento dos equipamentos.

O coeficiente CTP corresponde a uma constante referente ao preenchimento incompleto da carcaça com o número de tubos, devido as folgas necessárias no caso de projetos multitubos. Existem recomendações de valores a serem adotados respectivos ao número de passes na carcaça, sendo estes expressos na Tabela 8.

Tabela 8 - Recomendações de CTP por número de passes (Kakaç et al., 2012).

Passes	CTP
1	0,93
2	0,9
3	0,85

O coeficiente CL corresponde à disposição dos tubos em relação ao escoamento, as diferentes organizações de tubos tradicionais estão representadas na Figura 23.

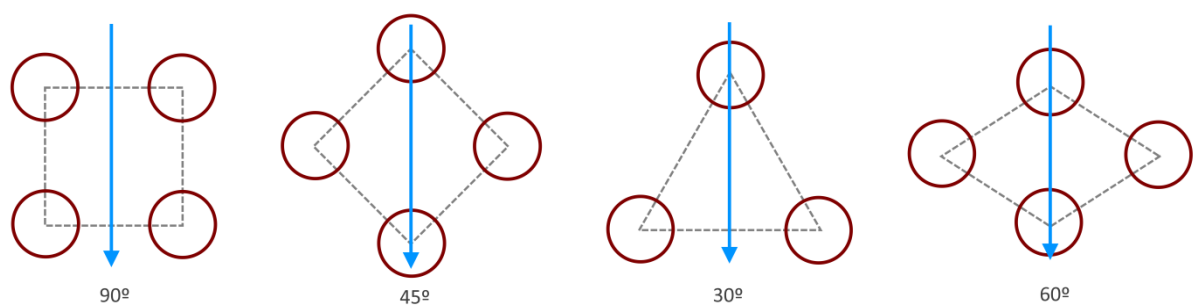


Figura 23 - Disposição dos tubos em relação ao escoamento.

Com as disposições elencadas anteriormente, é possível extrair o valor de CL a partir dos dados trazidos na Tabela 9.

Tabela 9 - CL para diferentes disposições

Disposição	CL
90° e 45°	1
30° e 60°	0,87

Uma vez que a instalação terá limitações de dimensões e sempre visando a compactação, os cálculos serão realizados em função do comprimento da carcaça. Com isto o diâmetro da carcaça ( $D_c$ ) pode ser obtido através da Equação 5.

$$D_c = 0,637 \sqrt{\frac{CL}{CTP} \left[ \frac{A (PR)^2 d_e}{L} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

Com isto já é possível calcular o número de tubos ( $N_t$ ) a partir da relação expressa na Equação 6, bem como o número de chicanas ( $N_c$ ), expressa na Equação 7. Ainda se deve extrair o *pitch ratio* (PR) com a relação explicitada na Equação 8 e a área de transferência de calor ( $A_0$ ), que será abordada posteriormente.

$$N_t = 0,785 \left( \frac{CTP}{CL} \right) \frac{D_c^2}{(PR)^2 d_e^2} \quad (6)$$

$$N_c = \left( \frac{L}{0,6 D_c} \right) - 1 \quad (7)$$

$$PR = \frac{P_T}{d_e} \quad (8)$$

A área de transferência de calor ( $A_0$ ) pode ser calculada para dois diferentes cenários, sendo estes nomeadamente com incrustações ( $A_f$ ), e sem incrustações ( $A_c$ ). A formulação para determinação das áreas está expressa pelas Equações 9 e 10, ambas aplicando os valores de diferencial logaritmico corrigido ( $\Delta T_{ln}^*$ ).

$$A_f = \frac{Q}{U_f \Delta T_{ln}^*} \quad (9)$$

$$A_c = \frac{Q}{U_c \Delta T_{ln}^*} \quad (10)$$

A relação  $A_f/A_c$ , ou seja, a relação entre área requerida limpa e com incrustações respetivamente não deve ser superior a 35% (1,35) sugeridamente. (Kakaç et al. 2012). A fim de determinar as áreas é preciso ainda encontrar os coeficientes globais de transferência de calor ( $U$ ), novamente com e sem incrustações, apresentados nas Equações 11 e 12 respetivamente.

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{h_c} + \frac{d_e}{d_i h_t} + r_0 \frac{\ln(\frac{d_e}{d_i})}{k} + R_{fc} + \frac{d_e R_{ft}}{d_i} \quad (11)$$

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_c} + \frac{d_e}{d_i h_t} + d_e \frac{\ln(\frac{d_e}{d_i})}{k} \quad (12)$$

Para o pré-dimensionamento, serão adotados coeficientes de transferência de calor típicos para o tipo de fluido, tanto para o fluido da carcaça quanto para o fluido que passa pelos tubos,  $h_c$  e  $h_t$  respetivamente. A condutibilidade térmica do tubo ( $k$ ) será associada ao material adotado, enquanto os valores de resistência a incrustação da carcaça e dos tubos,  $R_{fc}$  e  $R_{ft}$  respetivamente podem ser extraídas de tabelas

também em função do material (TEMA 2007). Com o cálculo dos coeficientes globais é possível encontrar as áreas, como estes permutadores estão sujeitos a acúmulos de incrustações em curto prazo será apenas considerada a área que leva em conta incrustações para os cálculos posteriores.

### 3.3.1.3 Perdas de carga

As perdas de carga serão determinadas a partir dos parâmetros calculados anteriormente, assim servindo de entrada para o dimensionamento final, como uma forma de correção para uma melhor aproximação do sistema real. Estas serão obtidas através do método de Kern, o qual permite aproximações significativas, ainda com certa simplificação e consequentemente maior praticidade para os cálculos. A perda de carga na carcaça pode ser obtida através da Equação 13. Utilizando do número de passes ( $N_p$ ), e a densidade ( $\rho$ ).

$$\Delta P_c = \frac{f_c G_c^2 N_p D_c}{2 \rho d_e \left( \frac{\mu_c}{\mu_t} \right)^{0,14}} \quad (13)$$

Enquanto a perda de carga nos tubos pode ser obtida através da Equação 14, as variáveis envolvidas para as Equações 13 e 14 serão abordadas na sequência.

$$\Delta P_t = \left( 4 f_t \frac{L N_p}{d_i} + 4 N_p \right) \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (14)$$

Caso satisfeita a condição de McAdams perante o número de Reynolds da carcaça ( $Re_c$ ) abaixo, o coeficiente de transferência de calor da carcaça pode ser obtido através da Equação 15.

$$2.10^3 < Re_c < 1.10^6$$

$$\frac{h_c D_e}{k} = 0,36 Re_c^{0,55} \left( \frac{c_p \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_c}{\mu_t} \right)^{0,14} \quad (15)$$

O número de Reynolds da carcaça por sua vez pode ser encontrado com a Equação 16.

$$Re_c = \frac{D_e G_c}{\mu_c} \quad (16)$$

O diâmetro equivalente ( $D_e$ ) pode ser obtido a partir da Equação 17, este varia de acordo com a disposição dos tubos selecionada.

$$D_e = \frac{4 \cdot \text{área de fluxo livre}}{\text{perímetro molhado}} \quad (17)$$

A velocidade mássica na carcaça ( $G_c$ ) pode ser obtida através da Equação 17, sendo este o quociente do fluxo de massa pela área de fluxo cruzado ( $A_s$ ).

$$G_c = \frac{\dot{m}}{A_s} \quad (17)$$

A área de fluxo cruzado pode ser obtida aplicando a Equação 18, onde  $C$  representa a espessura no diâmetro do tubo, ou seja,  $d_e - d_i$  e  $B$  representa o corte dos defletores.

$$A_s = \frac{D_c C B}{P_T} \quad (18)$$

Passando para a abordagem dos tubos, buscando encontrar o número de Reynolds no interior dos tubos ( $Re_t$ ), o qual pode ser obtido com a aplicação da Equação 19, utilizando da velocidade de transição ( $v_m$ ) o qual pode ser obtido com a Equação 20, este aplica a área de transição do tubo ( $A_{tp}$ ) que pode ser encontrado através da Equação 21.

$$Re_t = \frac{\rho u_m d_i}{\mu} \quad (19)$$

$$v_m = \frac{\dot{m}}{\rho A_{tp}} \quad (20)$$

$$A_{tp} = \frac{\pi d_i^2 N_t}{4} \quad (21)$$

Os fatores de fricção para a carcaça e para os tubos,  $f_c$  e  $f_t$  respetivamente, podem ser encontrados utilizando a Equação 22 para carcaça, uma vez que satisfeita a condição abaixo, e para os tubos utilizando a Equação 23.

$$400 < Re_c < 1.10^6$$

$$f_c = \exp[0,576 - 0,19 \ln(Re_c)] \quad (22)$$



$$f_t = (1,58 \ln(Re_t) - 3,28)^{-2} \quad (23)$$

O coeficiente de transferência de calor dos tubos pode ser obtido através da Equação 24, aplicando a correlação de Gnielinski para regime turbulento ( $Re > 10^4$ ) encontrando o número de Nusselt ( $Nu_b$ ) com a Equação 25.

$$h_t = \frac{Nu_b k}{d_i} \quad (24)$$

$$Nu_b = \frac{\frac{f_t}{2} (Re_t - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f_t}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (25)$$

### 3.3.2 Dimensionamento

Entrando em um ciclo iterativo com os valores encontrados no sistema com os resultados previamente obtidos, se atualizando conforme as perdas de cargas abordadas, para correções do coeficiente global, área de troca e diâmetro da carcaça, estes que influenciam entre si e passando novamente pelos cálculos de perda de carga.

## 3.4 Tanques

Os tanques envolvidos no sistema serão baseados nos utilizados em estações semelhantes. Serão alterados em capacidade volúmica e caso necessário acrescidos de dispositivo para redirecionar o escoamento ou então submetidos a diferentes acoplamentos. Estas alterações serão baseadas em experiências respectivas a estações anteriores.

Os dimensionamentos destes serão realizados a partir da seguinte ordem:

- Determinação de volume a partir de equipamentos semelhantes levando em conta os caudais conhecidos para este;
- Conexões, determinando entradas, saídas, e acoplamentos envolvidos a o tanque abordado;
- Simulação inicial em programa tridimensional (SOLIDWORKS) visando consolidar e agrupar soluções já encontradas;
- Contato com fornecedores, a fim de abordar diferentes soluções convergindo em uma sugestão final em termos de projeto;

- Consolidação dos parâmetros do componente e atualização da modelagem 3D, atingindo o objetivo e consolidando o projeto do equipamento encaminhado para futura execução;
- Realização de esquemática dos acoplamentos para melhor visualização.

### 3.5 Estudo de disposição

Visando sempre uma compactação e simplicidade de manutenção para cada equipamento, cada etapa deste estudo será acompanhada de uma visão geral compreendendo análise de espaços. A fim de aperfeiçoar a disposição, todo este processo será acompanhado por composições em 3D ciclicamente, sendo esta a proposta do projeto, tomar uma visão global de interferências.

A fim de realizar esta abordagem tridimensional e também englobar um dos objetivos propostos pela empresa, serão utilizados os programas de computador SOLIDWORKS como principal ferramenta, em comunicação com os produtos Autodesk AutoCAD e extraindo alguns componentes da biblioteca do Inventor convertidos para SOLIDWORKS.

### 3.6 Tubagens

As decisões de disposição nesta seção foram auxiliadas pela ferramenta Routing do programa de computador SOLIDWORKS, permitindo uma visualização tridimensional. A ferramenta ainda dá sugestão de melhores rotas quando indicadas as limitações e extremidades da linha.

Para a distribuição das tubagens será utilizada uma sequência de importância, de forma a privilegiar as primeiras com menos desvios e conseqüentemente menores perdas de carga tanto localizada quanto em linha. Vácuo será o primeiro, pois se trata do objetivo da instalação, seguido das linhas de água, pois se tem pressão e caudais limitados destinados a instalação além da necessidade de manter a temperatura, posteriormente as linhas de extração de condensados devido a necessidade de uma linha gravítica, e por últimos as linhas de retorno de água e ar comprimido, uma vez que estas são mais flexíveis.

1. Vácuo – Objetivo principal da estação;
2. Água de Arrefecimento – Fluido crítico para o funcionamento geral do sistema;
3. Condensados – Extração e encaminhamento dos rejeitos do processo;
4. Água de Retorno – Retorno da água de arrefecimento após os processos;
5. Ar comprimido – Acionamento de componentes, essencialmente válvulas.

Serão realizados cálculos em questão de caudais, respeitando velocidade máxima e perdas de carga envolvidas. Como não se trata do objetivo principal deste trabalho, coletores não serão considerados.

# DESENVOLVIMENTO

- 4.1 Espaço da instalação
- 4.2 Condições de entrada
- 4.3 Tubagens
- 4.4 Seleção de bombas
- 4.5 Dimensionamento dos permutadores
- 4.6 Tanques
- 4.7 Adequações da empresa
- 4.8 Diagrama da estação
- 4.9 Desenho 3D da estação



## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Espaço da instalação

A localização fora determinada via processo interno da empresa, sendo este definido ao fim do Corredor A, conforme já representado na Figura 20 – Planta da Região de instalação: área hachurada a destinada a conexões entre piso inferior e superior próximo ao corredor de prensas. Uma vez que o espaço no piso térreo é limitado, os equipamentos deverão ser localizados no subterrâneo, assim podendo manter o nível da tubulação de vácuo. A galeria deverá ser escavada e preparada para alocar a estação.

O espaço a ser escavado para tal galeria deve ser determinado em conjunto com a equipe de engenharia civil da Continental, confrontando desta forma requisitos do projeto com viabilidade do espaço e suas limitações. Isso fora realizado de forma iterativa passando ciclicamente entre projeto, equipe de civil e empresas terceiras como orçamentárias.

Segundo o regulamento interno ainda, existem alguns requisitos a serem cumpridos e adotados, bem como instalação de estruturas protetivas e garantia de espaços de manutenção, sendo estes definidos por 0,8 metros de livre acesso aos componentes do sistema e suas instrumentações.

Fora questionado a não escavação da galeria, assim sugerindo todo o sistema acima do piso térreo, e escavado apenas calhas para comportar parte da tubulação, sendo que a perda de carga seria relativamente próxima entre ambos os sistemas, reduzindo drasticamente os custos de escavação. Esta opção fora rejeitada pela empresa justificada pela ocupação um maior espaço no piso fabril além de maior dificuldade para limpeza dos permutadores de calor em processo de manutenção. Com isso fica definido a escavação e instalação subterrânea, mantendo o padrão das instalações.

Um estudo prévio baseado em modelo de estação similar fora realizado a fim de prever a profundidade de escavação, se aproximando ao teto da galeria subterrânea, o valor encontrado é de 2,99 metros, como representado na Figura 25 em milímetros.

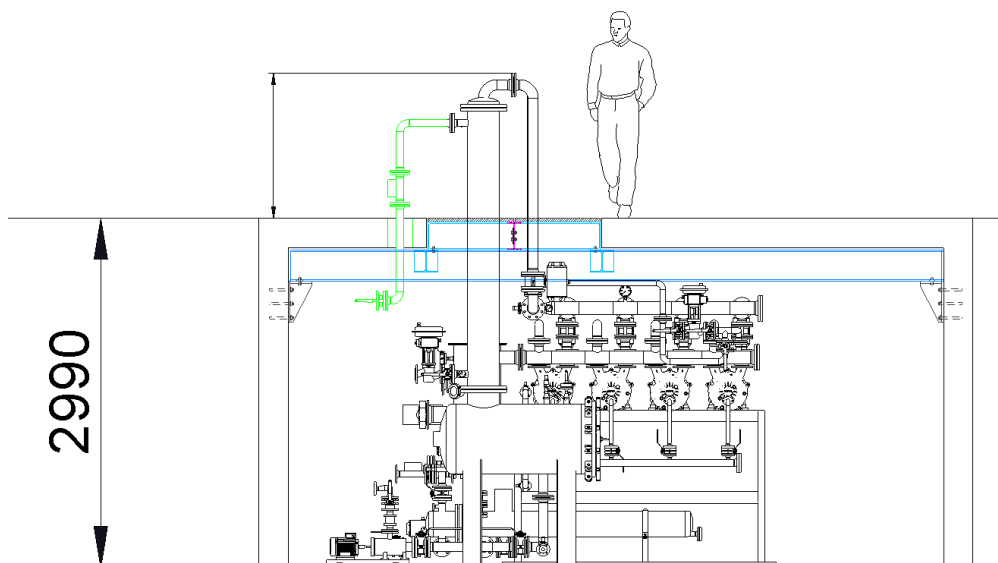


Figura 25 - Estimativa inicial com base em instalações semelhantes.

Outra peculiaridade do projeto é uma janela, responsável pela abertura entre o subsolo e o nível 0, esta seguindo padrões já existentes na empresa é estipulada com dimensões 3 x 1,5 metros, onde devem atravessar em princípio os permutadores e tubagem direcionando as linhas de vácuo. A abertura com suas devidas dimensões e com suas devidas dimensões no espaço é indicada na Figura 24.

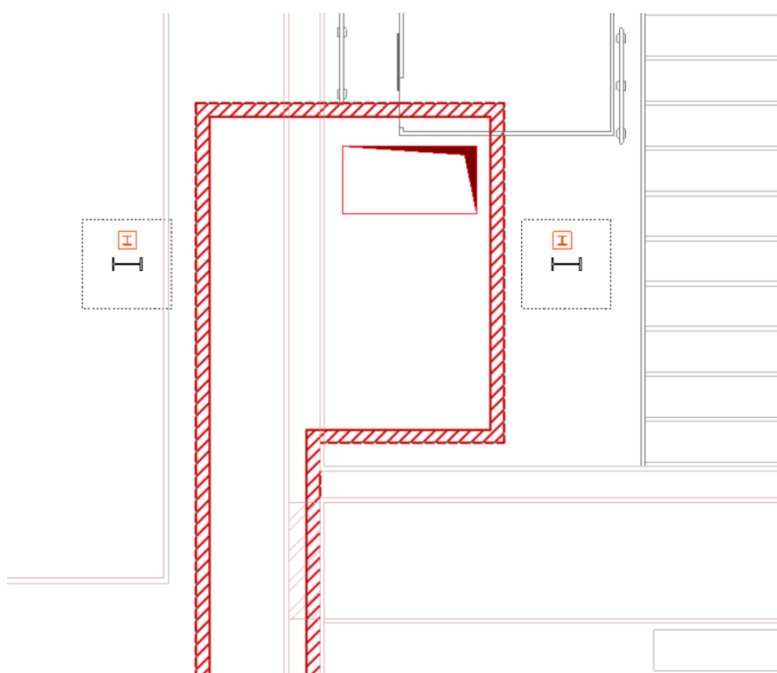


Figura 24 - Representação do espaço e janela.

#### 4.1.1 Localização e dimensões

A fim de precisar a localização e prever a posição real fora observado desvios em relação ao corredor e vigas já existentes em relação ao desenho em CAD obtido da fábrica, desta forma alguns ajustes foram realizados. Os pontos de referência foram alterados para as distâncias entre vigas, além de um afastamento do pilar esquerdo que está mais deslocado para a região da futura estação, uma vez que os pilares possuem grandes sapatas que serão obstáculos para a escavação. Um ponto ainda a ser levado em conta são as delimitações dos corredores, uma vez que a abertura deve estar fora dos espaços de circulação e não acarretar em desvios destes, uma vez que a estação está localizada em uma região de alta circulação tanto de peões quanto carrinhas.

Para a modelagem 3D da nova estação, foram definidos inicialmente os pilares principais, já com suas respectivas posições corrigidas, assim gerando um novo centro do espaço, a relação deste espaço com o corredor subterrâneo já existente fora definida através da correlação entre medições aferidas e os esquemas em CAD citados anteriormente. Os limites dimensionais ainda não definidos pela equipe de engenharia civil, porém com um mínimo estabelecido, este sendo 6 x 7 metros, desta forma resultando na modelagem de espaço demonstrado na Figura 26 em milímetros.

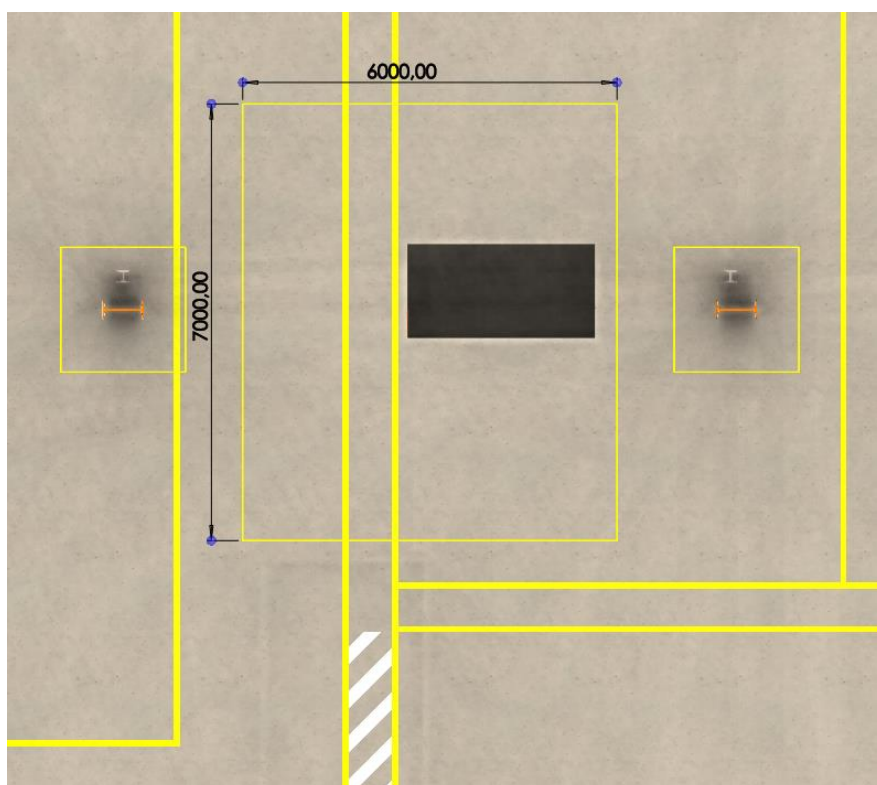


Figura 26 - Modelagem base da galeria.

#### 4.1.2 Posição da abertura

A abertura tem finalidade de conexão entre o nível zero e o subsolo sendo ultrapassada por tubagens e o permutador de calor, deste modo, a definição da posição desta altera a disposição dos equipamentos na galeria. Sendo limitada pelas delimitações dos corredores e paredes da galeria como pode ser visualizado na Figura 26, esta ainda pode ser rotacionada.

A fim de uma decisão acertiva a estação fora analisada como visto na Figura 25, a instalação conhecida possui quatro bombas dispostas em linha, a fim de compactação é analisada uma disposição em paralelo, assim compactando o sistema e sem maiores complicações, uma simulação inicial efetuada é expressa na Figura 27, fixado em uma representação das medidas da janela.

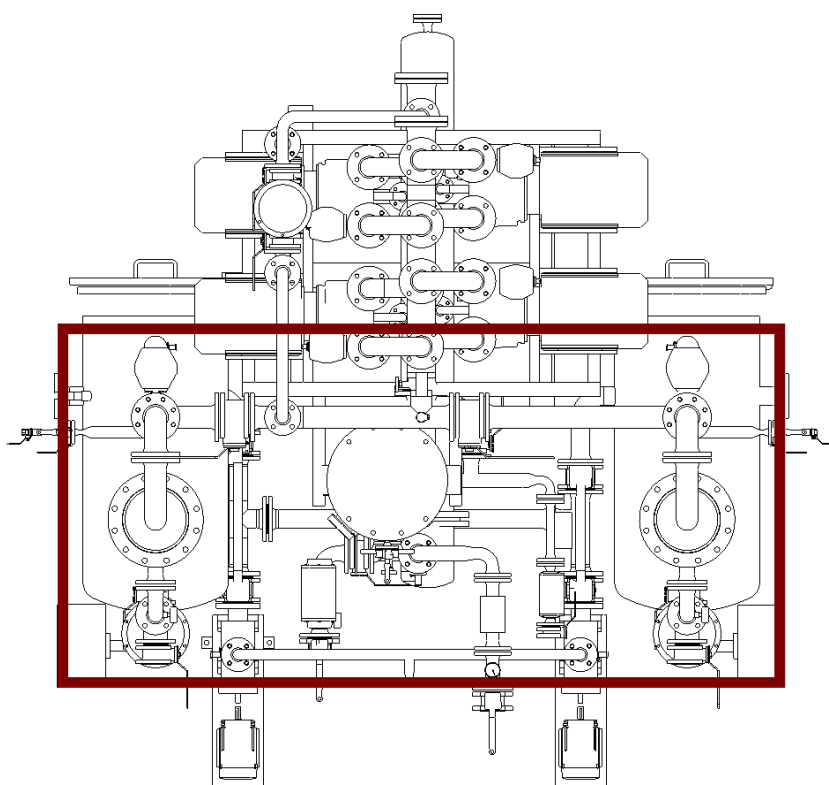


Figura 27 - Simulação da estação com bombas em paralelo em vista superior.

A compactação foi efetiva e assim esta disposição será adotada para futuras análises, para a abertura esta compactação resulta em maior liberdade para o posicionamento. A fim de efetuar uma simulação fidedigna, foram demarcados corredores com hachuras, com dimensão de 0,8m requeridos para manutenção dos equipamentos em todo o entorno da galeria, além da representação de um tanque vertical, o qual será destinado à extração de condensados, este ainda não possui diâmetro definido, mas fora representado por hora com 1,3 metros de diâmetro. A simulação em CAD aplicando as alterações abordadas é apresentada na Figura 28.



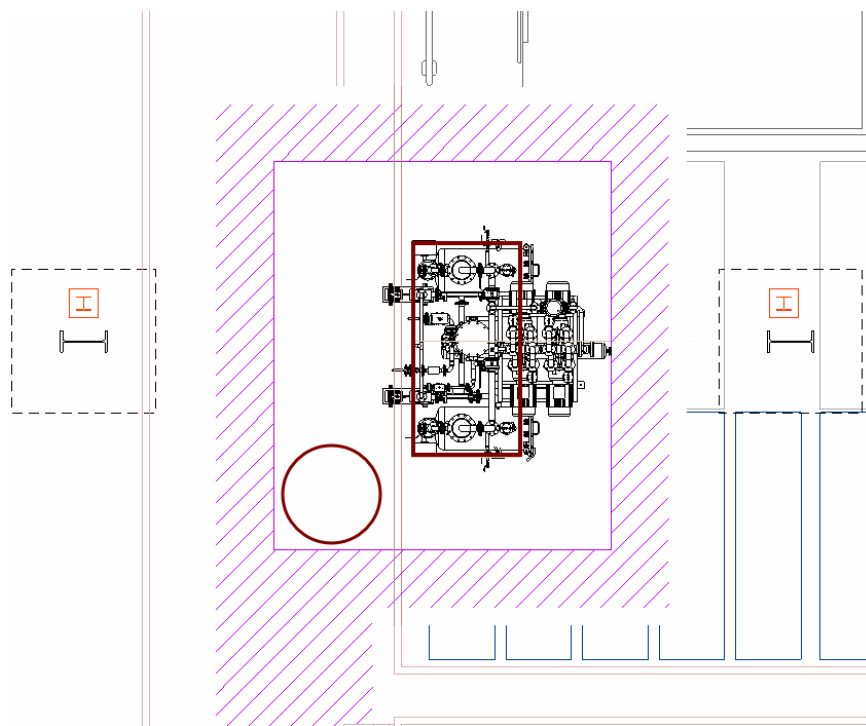


Figura 28 - Disposição com a Abertura na vertical.

A disposição observada na Figura 28 tem como maior complicação a distribuição das tubagens, por afastar conexões das paredes se torna previsível a obstrução de passagem humana além de uma menor liberdade de organização destes. Outro ponto observado é que em caso de manutenção do permutador horizontal (perpendicularmente centrado na parte inferior da estação) não há espaço hábil para remoção deste. Uma nova simulação fora realizada a fim de determinar o melhor posicionamento da abertura, desta vez na posição horizontal, é expressa na Figura 29.

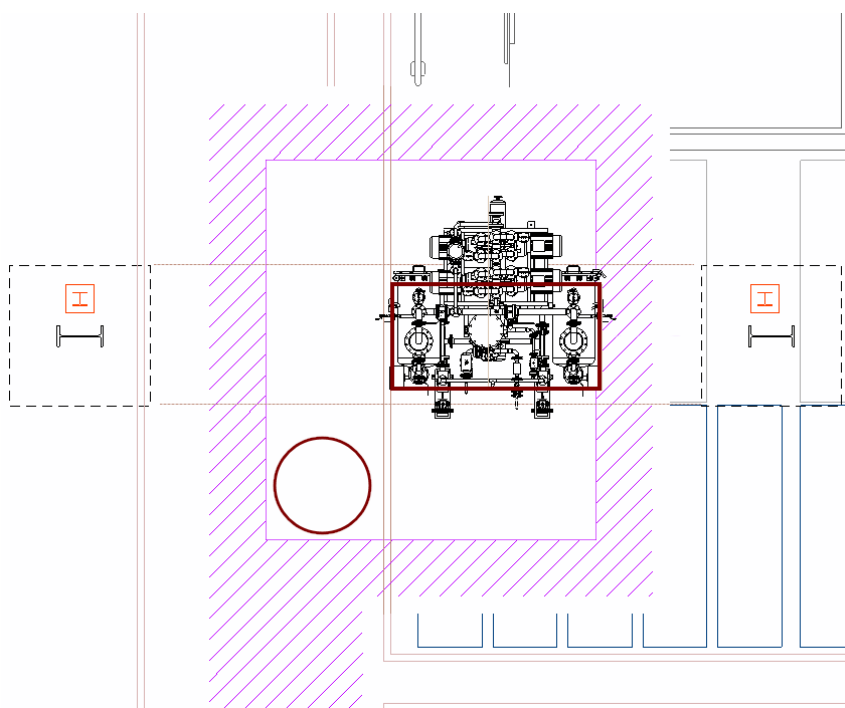


Figura 29 - Disposição com a Abertura horizontal.

Centrado entre os limites as sapatas dos pilares a fim de garantir maior eficiência estrutural, delimitada ao máximo junto à limitação do corredor, esta posição implica em um bom espaço de circulação além da possibilidade de posicionamento das tubagens junto às paredes, desta forma tendo sua posição fixada, o tanque de condensados ainda pode ser aproximado à parede esquerda, deixando todo um espaço efetivo para interação com os equipamentos da estação.

#### 4.1.3 Profundidade

Após algumas iterações com a equipe de engenharia civil, fora retornado a espessura da laje, sendo esta de 0,3 metros. Durante pesquisa sobre estações de outras unidades, se encontrou uma problemática ocorrida em outra instalação em galeria subterrânea, uma vez que estas estão postas no ponto mais inferior são altamente suscetíveis a inundações, sempre equipadas com bombas de drenagem, porém fora relatado o caso onde esta bomba falhou e consequentemente o nível da água fora capaz de alcançar o motor das bombas gerando uma paragem de 24 horas. A fim de contornar os riscos de inundação será adotada uma elevação dos equipamentos e consequentemente de toda a estação.

Desta forma, se tem que a profundidade final da galeria é igual à espessura da laje, somado a altura de inundação, a altura subterrânea dos equipamentos e folga entre os equipamentos e a laje, ou seja,  $0,35+0,3+2,65+0,1 = 3,4$  metros. Assim resultando na definição exposta na Figura 30 em comparativo com a já existente em milímetros.

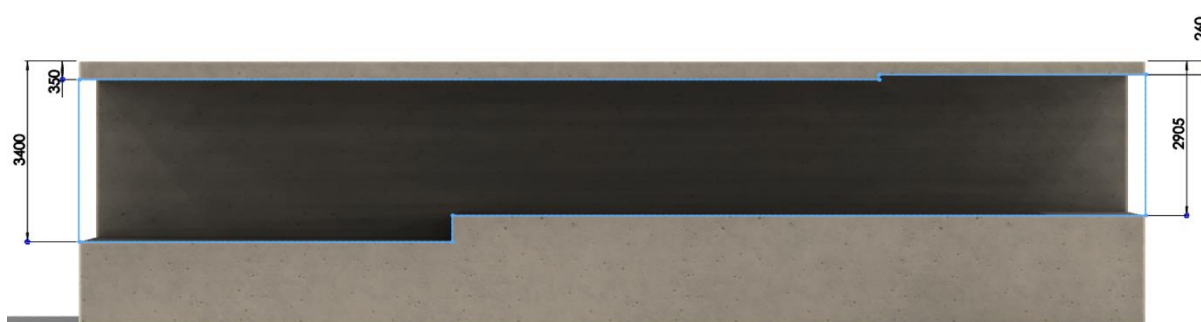


Figura 30 - Profundidades das galerias.

Por se tratar de uma profundidade ainda maior do que a galeria já existente acaba sendo necessário à aplicação de calhas no entorno da galeria, para drenagem de eventuais resíduos acumulados nesta, estes serão direcionados a um fosso onde posicionada uma bomba de drenagem até a outra galeria.

#### 4.1.4 Corredor de ligação

Devido a diferença de alturas, a conexão entre o corredor já existente e a nova galeria, o corredor deve cumprir com o requisito de drenagem gravitacional e ainda, permitir a passagem e manutenção das tubagens. Foram encontradas três possibilidades, apresentadas a seguir.

##### Cenário 1 – Corredor Aberto

Neste caso o corredor acompanhará o nível do atual, assim tendo altura suficiente para o escoamento gravitacional de forma direta e aberto, sendo direcionado por calhas posicionadas na lateral do corredor. Este acaba por ser o mais custoso devido ao volume de escavação.

##### Cenário 2 – Tubagem em Ressalto

Para este cenário a proposta se reduz o custo da escavação, e a circulação fica limitada não conectando o corredor atual a nova galeria, de forma que exista apenas passagem para a tubagem. Conforme explicitado na Figura 31, já com representação adicional do tubo de drenagem inferior.

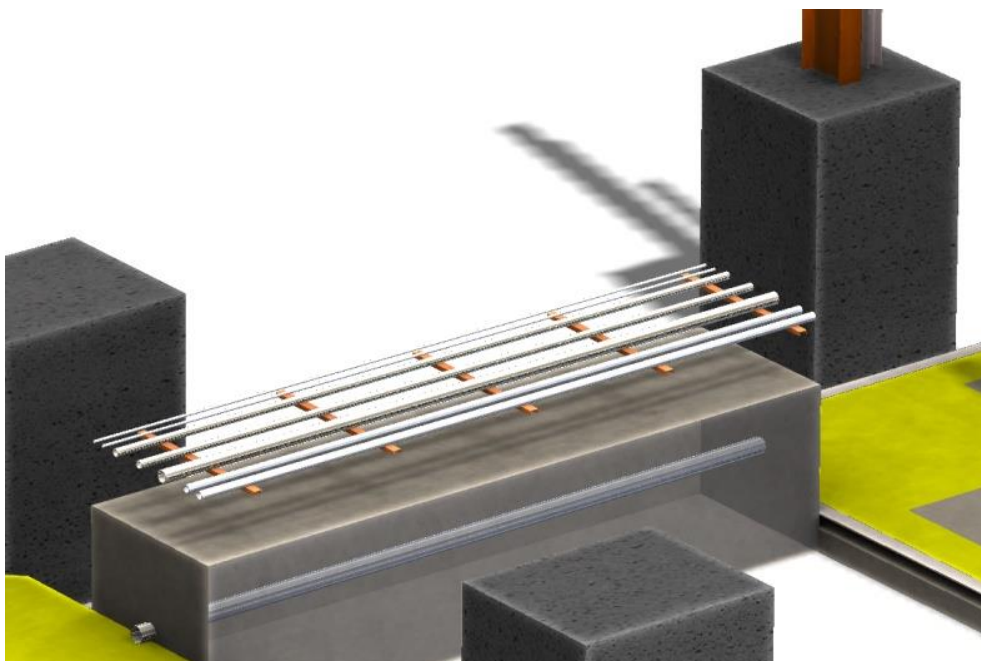


Figura 31 - Ensaio do corredor com tubos lado a lado.

Um obstáculo inicialmente observado para este caso ocorre por se tratar de uma extensão superior a medida padrão de comprimento dos tubos, 6 metros, desta forma as conexões permanentes por solda ou flangeadas ficariam inacessíveis em caso de manutenção ou substituição das linhas envolvidas. Se torna imperativa a realização de uma forma de acesso para estes pontos de união, a opção encontrada é uma abertura semelhante à discutida no tópico 4.1.2, porém esta com um tampo a ser aberto apenas em casos de manutenção das linhas.

Fora realizado uma amostra de passagens decorridas num período de 10 minutos em horário correspondente ao meio do turno de trabalho. Donde cada seta representada corresponde a duas passagens, de forma a simplificar a representação, assim os carros diretamente afetados correspondem a 35 % da circulação no local, exigindo redução de velocidade e/ou cautela na transição, enquanto indiretamente, ou seja, solicitando desvio cerca de 27 % da circulação no local. Conforme apresentado na Figura 32, onde estão indicadas por setas as trajetórias registradas, sendo que cada seta equivale a 2 passagens a fim de proporcionar uma visualização mais clara, estando representados ainda a posição da VS2 e posição prevista para o acesso as tubagens.

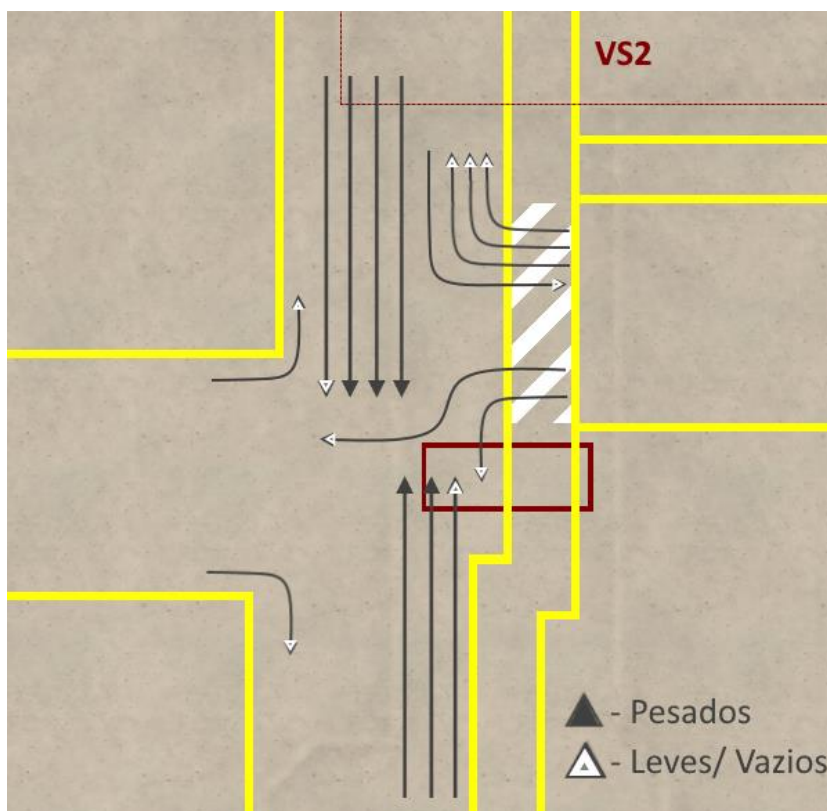


Figura 32 - Frequência de fluxo de carrinhas nos corredores.

Tubo a ser inserido por uma forma de escavação mais simples e econômica, este responsável pela drenagem gravítica. Posicionamento da tubulação iniciado pelo tubo de vácuo, sendo este o mais importante e necessário manter uma baixa perda de carga, e subsequentemente inserindo os demais. A proposta de disposição das tubagens a serem inseridas é descrita a seguir e representada na Figura 33. Tendo seu arranjo de disposição da esquerda para a direita da seguinte forma:

- Ar comprimido (800 kPa) DN25
- Ar comprimido (1300 kPa) DN25
- Condensados (Bombagem) DN80
- Condensados (Gravítico) DN80
- Vácuo (Isolado) DN125
- Água de arrefecimento (Retorno) DN80
- Água de arrefecimento (Chegada isolada) DN80

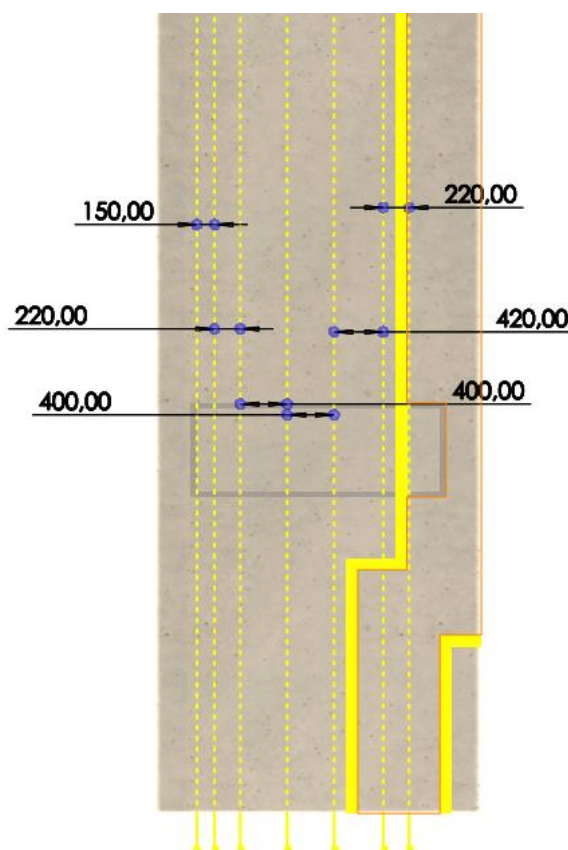


Figura 33 - Distância entre os centros de tubagens incluindo revestimento via norma.

O “corredor” deve contar ainda com 1,3 m de profundidade (0,6 superior e inferior para soldagem incrementado por 0,1 respectivo ao diâmetro médio das tubagens). Para a disposição lado a lado deve contar com 2,2 m de largura (contabilizando os espaçamentos entre estes e folgas das paredes).

### Cenário 3 – Misto

Este caso faz uso de ideias apresentadas nos cenários anteriores, assim resultando em um corredor com ressalto, mas ainda permitindo passagem de pessoas e com o tubo de drenagem.

Apesar de conceitualmente não se mostrar muito vantajosa, após algumas iterações com empresas executoras, esta opção foi selecionada pela equipe de engenharia civil, tendo em vista a circulação de pessoas e ainda a manutenção da capacidade estrutural dos pilares de sustentação sem que sejam realizadas escavações mais profundas neste percurso, sem grandes adições de custos ao projeto. O resultado final é apresentado na Figura 34.

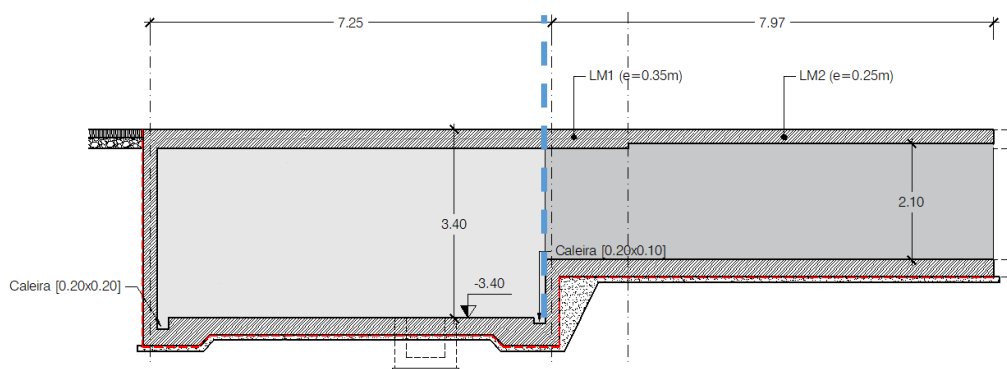


Figura 34 - Projeto final de profundidades.

Com isto já é possível inserir os demais componentes essenciais de drenagem e escadas de acesso requeridas para tal altura. A modelagem 3D é exposta na Figura 35.



Figura 35 - Tubo de drenagem com declínio no corredor.

A tubagem foi inserida abaixo das escadas a fim de utilizar desta como uma proteção para a não intrusão acidental de grandes objetos. Esta disposição permite ainda o alojamento de tubagens sobrepostas, uma vez que a manutenção terá acesso facilitado.

#### 4.1.5 Escadas

Por se tratar de uma instalação em dois pisos é intuitiva a idealização de uma escada de acesso entre estes. A Continental conta com um regulamento interno de dimensionamento de degraus que garantem a segurança e conforto dos que nestes circulam.

Respeitando a norma correspondente a Equação 26 a qual mantém proporção de inclinação, donde  $L$  corresponde ao comprimento do degrau e  $h$  a sua respetiva altura (Norma ISO 14122).

$$600 \geq L + 2h \geq 660 \quad (26)$$

Desta forma, para degraus com 0,2 m de altura, o que proporciona uma alta elevação ainda dentro dos padrões de conforto, seria necessário 0,24 m de comprimento por degrau. Foram analisadas disposições em linha reta, em forma de U e em L. A disposição reta foi descartada por invadir espaço destinado a armazenamento, enquanto em U foi descartada pela maior extensão proporcionada. A disposição em L apresenta melhor acessibilidade e compactação no espaço proposto, sem maiores interferências nos arredores. A resultante desta abordagem está expressa na Figura 36.

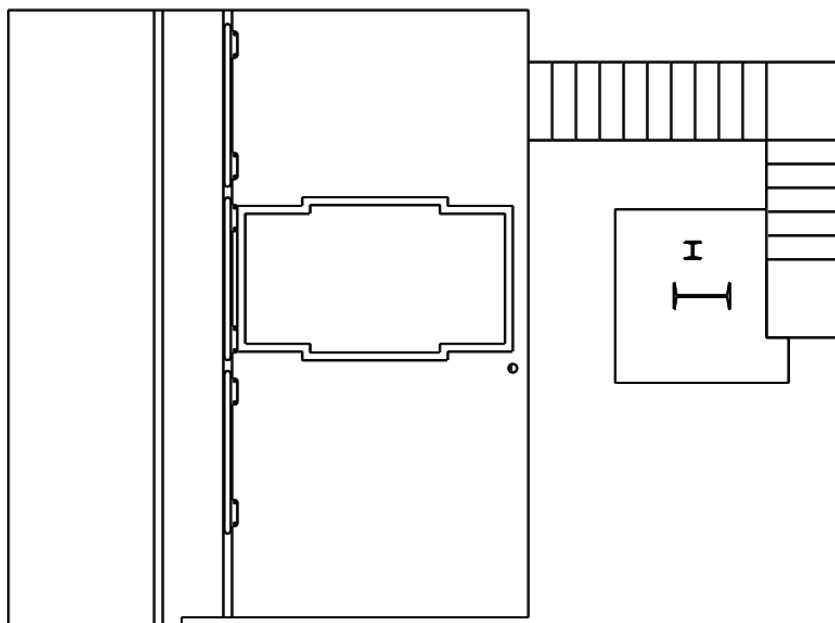


Figura 36 - Definição da escada em vista superior.

## 4.2 Condições de entrada

A fim de dimensionar os principais componentes assim fixando suas geometrias e disposições, primeiro é essencial a determinação precisa das condições de entrada do sistema. Para água de arrefecimento já se tem a fonte identificada, sendo necessário apenas encontrar o caudal disponível e sua temperatura. O vácuo, sendo a razão da instalação precisa ser precisamente determinado, para posterior seleção de bombas e dimensionamento dos demais componentes do sistema. Esta estação precisa ter caudais respetivos à capacidade para suprir a demanda requisitada por até 150 prensas em simultâneo. Por se tratar de um sistema redundante, apenas metade da capacidade deve estar em atividade, estando preparadas para uma produção excepcional e/ou futuras expansões.

### 4.2.1 Águas de arrefecimento

Identificadas as fontes dos outros sistemas provenientes do mesmo local, sendo este um conjunto de torres de tratamento e armazenamento de água, ainda responsável por alimentar toda a fábrica com águas a baixas temperaturas para toda a unidade fabril através de bombagem.



Após analisado, fora identificado a suficiência e capacidade de incremento para os valores já bombeados. Tais valores não serão explicitados, apenas a capacidade disponível em determinado ponto próximo das prensas de vulcanização, distribuído na área onde será instalada a nova estação. As temperaturas alcançadas foram obtidas respetivas a monitoramento ao longo de todo o ano de 2019, assim permitindo uma identificação atualizada e precisa para futuros cálculos.

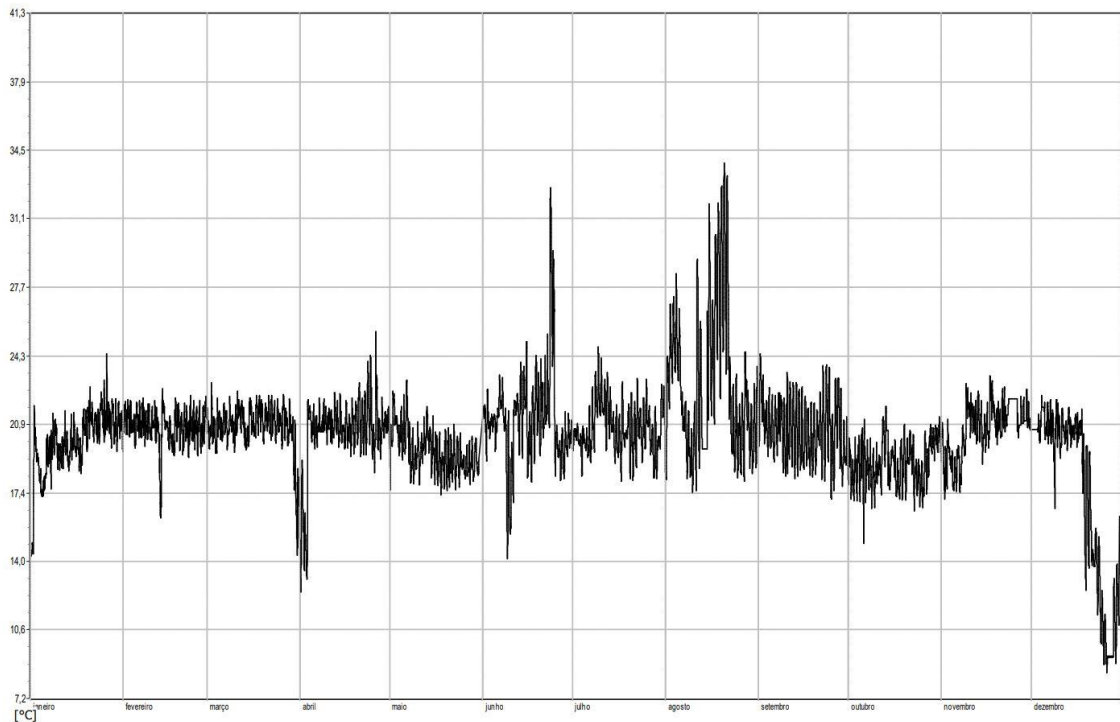


Figura 37 - Gráfico de temperaturas da água no ano de 2019.

A partir do gráfico exposto na Figura 37, fora obtido os valores de máximo 33,9°C e mínimo de 8,5°C, porém se observou que estes valores extremos foram registrados durante as paragens da empresa, assim descartando estes extremos. Excluindo os valores extremos se tem uma média de 20,9°C. O valor adotado será de 23°C, visto que existem vários picos frequentes próximos a esta faixa no período de verão, além de que quando ultrapassado este valor é apenas um pico súbito e não contínuo. Como para projeto se assumem valores de limite, será considerado este valor para a saída das torres e entrada das águas de arrefecimento no sistema (posteriormente submetido a correção de perdas).

O caudal volúmico pode ser definido pela Equação 27.

$$Q = v \cdot A \quad (27)$$

A área do círculo a partir do diâmetro da circunferência por sua vez pode ser obtida através da Equação 28.

$$A_{circ} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (28)$$



Uma vez que já se tem a tubulação definida para um diâmetro nominal de 80 milímetros, também estabelecido por questões acústicas da fábrica a velocidade máxima no interior da tubulação em 2,5 m/s. É possível determinar de forma direta o caudal disponível para a estação, resultando no valor de 0,0125664 m<sup>3</sup>/s. Estes dados foram registrados a fim de organização e melhor visualização na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades da Água de arrefecimento

Propriedade	Medida	Unidade
Pressão	330	kPa
Temperatura	23	°C
Caudal volúmico	0,0125	m <sup>3</sup> /s

Os valores apresentados na tabela ainda representam valores irreais, uma vez que não estão consideradas perdas de carga até o espaço da instalação, estes cálculos mais apurados serão efetuados posteriormente, após o estudo da tubagem.

#### 4.2.2 Vácuo

O vácuo sendo o grande princípio da estação deve ser criteriosamente estipulado, como analisado em outras estações, este não vem apenas como vapor em baixas pressões, trás consigo também condensados sujos e resíduos provenientes do processo de vulcanização.

Nas prensas é utilizado o vapor sobreaquecido, e posteriormente este deve ser condensado e separado entre líquido e vapor, e então encaminhar este para as bombas de vácuo, ou seja, passando pelo condensador estas partes devem ser separadas.

Inicialmente devemos constatar as propriedades de saída do processo de vulcanização, nomeadamente vapor de água a -30kPa de pressão relativa e em torno de 90°C. Para determinação da pressão total, é necessário precisar a pressão atmosférica. Para encontrar a pressão absoluta no sistema, será utilizada a soma da pressão relativa e atmosférica, conforme a Equação 29.

$$P = P_{atm} + P_{relativa} \quad (29)$$

As instalações da Continental Mabor possuem segundo dados topológicos de Portugal, altitudes entre 43 e 48 metros com uma média de 45 metros, como pode ser observado na Figura 38. Com esta informação é possível determinar a pressão atmosférica criteriosamente utilizando a Equação 30.

$$P_{atm} = 101,325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot Z)^{5,2559} \quad (30)$$



Figura 38 - Gráfico de altitudes na região da Empresa.

O cálculo é realizado comparando dados em nível do mar, ou seja 0 metros de altitude, dessa forma a diferença de altitudes se torna a própria altitude analisada (Z), e a pressão atmosférica correspondente ao nível zero é de 101,325 kPa. Assim resultando em uma pressão atmosférica de 100,7856 kPa e consequentemente uma pressão absoluta (aplicando a Equação 29) de 70,7856 kPa.

Nas prensas este vácuo é controlado por válvulas proporcionais, esse vapor passa por diversos estágios, passando por diferentes níveis de pressão e consequentemente de temperatura. No processo de vulcanização o vapor alcança níveis de até 1600 kPa de pressão relativa, para a aspiração por vácuo em torno de -30kPa em pressão relativa, identificado o ponto de transição na válvula, e então em toda a tubagem até a estação estão previstos -50 kPa.

Com estas informações já é possível encontrar as temperaturas para as respetivas pressões nas tabelas relativas a vapor sobreaquecido, presentes no Anexo 3. Não será possível encontrar valores de pressão exactos, neste caso será realizada uma aproximação por interpolação linear, expressa na Equação 31.

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (31)$$

Com exceção do ponto de máxima pressão onde apresenta altas temperaturas em relação à pressão, nos demais pontos se observou um aumento gradual nos condensados de água, através de fugas de vapor, manutenção de tubagem e em pontos finais da estação, o que indica grande proximidade a temperatura de saturação. Os valores encontrados estão expressos na Tabela 11, ainda acrescidos de outra etapa ja consolidada a fim de acompanhar a evolução.

Tabela 11 - Propriedades do vapor em diferentes etapas.

Etapa	Pressão (kPa)	Temperatura (K)
Enformação	419,3868	484,15
Vulcanização Início	1.750,7856	-
Vulcanização Fim	1.320,7856	-
Alívio	100,7856	-
Aspiração por vácuo	70,7856	363

#### 4.2.2.1 Caudal

O caudal de vapor extraído pelo vácuo deve corresponder às necessidades das prensas de cura que o solicitam, neste caso 150 prensas que correspondem a 300 cavidades, prevendo o funcionamento de todas estas em simultâneo, ou seja, produzindo 300 pneus ao mesmo tempo. A utilização do vácuo nas prensas ocorre em média em períodos de 20 segundos, com pequenas variações entre os diferentes tipos de configurações para diferentes pneus. A demanda não é sincronizada, ou seja, a demanda por vácuo não ocorre por todas as cavidades simultaneamente, isso se deve ao fato de os operadores iniciarem os ciclos de vulcanização de forma sequencial por corredor. A fim de mensurar a utilização do vácuo foi encontrado um estudo o qual apresenta uma amostragem de 10 minutos do número de prensas com utilização do vácuo. Os dados resultantes são exibidos na Figura 39.

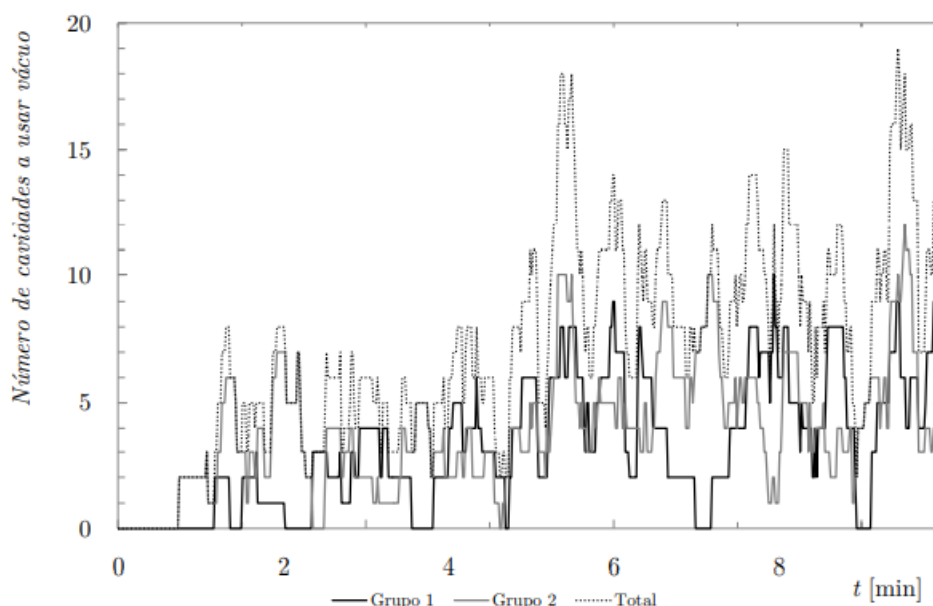


Figura 39 – Cavidades a usar vácuo durante 10 minutos. (Rafael et al. 2014)

Para o grupo 2, explicado na sequência deste, os valores obtidos resultam em uma média de 5,7 cavidades com um máximo de 12, e registro no histórico de até 20. Os grupos analisados pela figura anterior constituem em uma subdivisão da VS1, conforme expresso na Figura 40.

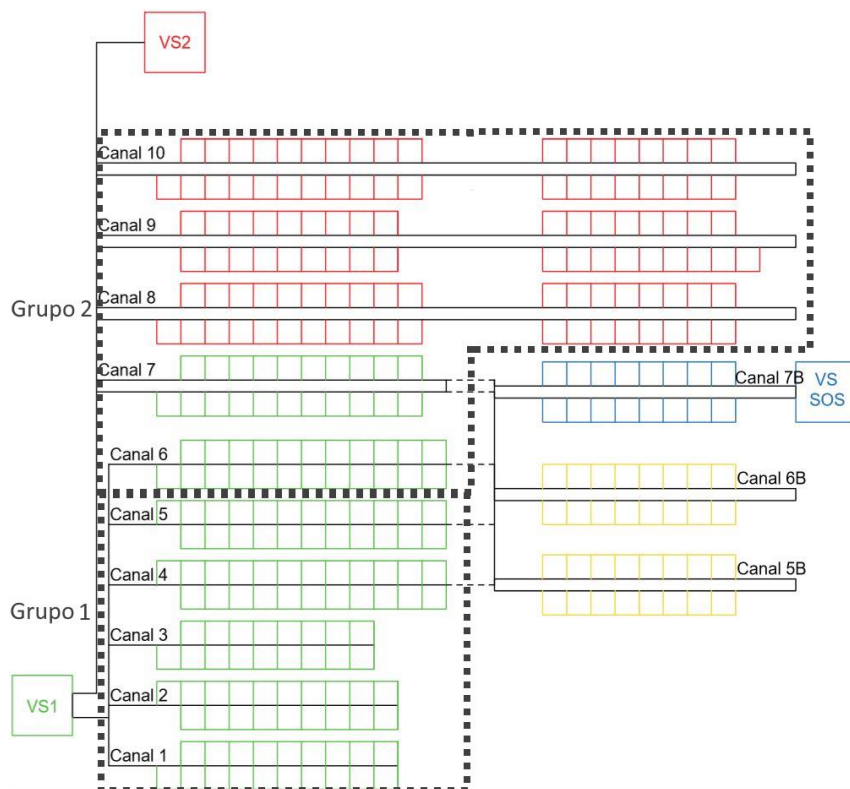


Figura 40 – Grupos analisados.

O denominado 'Grupo 2' conta com 168 prensas, enquanto a VS2 será responsável inicialmente por 150 prensas. Desta forma caudal adotado será correspondente a 17,857 cavidades abertas em simultâneo, esta quantidade fora obtida através da utilização do número de prensas do grupo 2 e seu pior cenário (20 cavidades), associando a densidade presente é possível determinar o caudal. Os volumes puderam ser obtidos através de um livro técnico utilizado pela empresa, o qual não é referenciado por conta de confidencialidade. Os volumes obtidos são expressos na Tabela 12.

Tabela 12 - Volumes dos diferentes diafragms utilizados.

Diafragma Tipo	Volume (m <sup>3</sup> )
1	0,016121
2	0,018483
3	0,022916
4	0,040785
5	0,020605
6	0,025412
7	0,04297

Tabela 12 (continuação) – Volumes dos diferentes diafragmas utilizados.

8	0,053295
9	0,020862
10	0,021359
11	0,023385
12	0,025118
13	0,031423
14	0,030281
15	0,033099
Média	0,028408

Os diferentes diafragmas são utilizados para diferentes medidas de pneus, ou seja, também submetidos a grandes variações conforme a demanda de produção, porém se sabe que o volume de utilização das menores medidas é substancialmente superior, desta forma adotar o valor médio se torna mais um fator de segurança e em caso excepcional onde produzida uma grande quantidade de maiores medidas o sistema reagirá sem complicações. A obtenção do caudal pode ser realizada através da multiplicação do volume pela densidade ( $\rho$ ), a densidade por sua vez pode ser obtida através da Equação 32, em relação direta com o volume específico.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (32)$$

O volume específico por sua vez pode ser obtido para a pressão abordada de tabelas termodinâmicas, este é encontrado equivalendo a 2,3648 m<sup>3</sup>/kg (Bombay 2016), assim obtendo uma densidade de 0,4229 kg/m<sup>3</sup>. O caudal debitado pelo vácuo pode ser obtido a partir da Equação 33.

$$Q_{\text{vácuo}} = \frac{n^{\circ} \text{ cavidades}}{s} \frac{V_{\text{diafragma}}}{t_{\text{ciclo}}} \quad (33)$$

Desta forma o caudal volúmico a ser debitado no sistema pela central de vácuo para o tempo de ciclo ( $t_{\text{ciclo}}$ ) padrão de 20 segundos, é de 0,0254 m<sup>3</sup>/s = 91,3107 m<sup>3</sup>/h para o pior caso, e para cenário normal é estimada uma demanda correspondente a 10,714 cavidades (obtido com o valor máximo das 168 prensas para 150 prensas) sem contar ainda o volume médio de diafragmas, o caudal seria de 0,0152 m<sup>3</sup>/s = 54,7854 m<sup>3</sup>/h, ou seja, em torno de 60% do caudal adotado.

Atualmente, cerca de 50% do ar evacuado corresponde a introdução proposital no sistema, possuindo ainda fugas não quantificadas relativas a trocas e manutenções de diafragmas. (Rafael et al. 2014). Desta forma o caudal adotado será dobrado respetivamente ao acréscimo de caudal inserido, atingindo assim o caudal volúmico de 182,88 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.2.2.2 Resíduos

Os resíduos encontrados no vácuo foram identificados a partir da observação do processo, o diafragma que realiza a vulcanização dos pneus, entra em contacto diretamente com o interior do pneu verde, o qual é lubrificado. As características dos resíduos encontrados junto à extração de condensados, de outras estações correspondem aos aspectos observados nos lubrificantes. Além dos lubrificantes dos pneus, podem também aparecer lubrificantes de componentes da prensa além de detritos respetivos a falhas nos diafragmas, e também oxidação do interior das tubagens.

Os lubrificantes utilizados na vulcanização de pneus e que podem chegar ao sistema de vácuo foram identificados como os lubrificantes Rhenodiv e Lyndcoat Wacker, além de resíduos da tintura dos diafragmas. As propriedades encontradas nos catálogos destes são listadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Propriedades dos resíduos.

	Tintura dos diafragmas	Lyndcoat	Rhenodiv
Sólidos (%)	30	25,5	47
pH (-)	9	4	~8,2
Viscosidade (Ns/m <sup>2</sup> )	0,01	1,2~1,9	0,361

Atualmente na *VS1*, estes são destinados a um tanque aberto, juntamente a água de arrefecimento direcionada ao sistema, selante das bombas de vácuo e os condensados provenientes do vapor, como pode ser observado no PI&D apresentado na Figura 7. No sistema atual todos os fluidos citados são misturados em um único tanque, desta forma se torna difícil precisar o que é proveniente de qual parte, quanto mais o percentual volúmico ou caudais respetivos aos resíduos presentes no sistema.

A determinação se torna ainda mais complexa uma vez que os lubrificantes utilizados passam por distintas aplicações conforme a especificação dos pneus produzidos e a combinação destes estão perante diárias alterações. Ante as limitações encontradas, o estudo de forma mais acertiva será proposto para trabalhos futuros. Para este trabalho serão aplicadas correções de perdas de carga a partir do sistema atual, e para sua extração junto aos condensados, utilizadas bombas com tolerância para fragmentos sólidos de até 5 mm e filtros para proteção das mesmas.

#### 4.2.2.3 Perdas de carga

Segundo o estudo de (Rafael et al. 2014), é observado uma grande perda de cargas nos extremos dos corredores considerando leituras máximas e com incrustações, por se tratar de uma longa fila de prensas.

Este estudo se aplica para este caso uma vez que serão utilizadas as mesmas linhas de tubagem, divergindo apenas que a perda linear será menor, porém serão aplicados mais acessórios para direcionamento, desta forma representa uma boa aproximação. Após as devidas correções se torna seguro assumir uma perda de 10 kPa para todo o sistema, desta forma extraíndo os valores correspondentes da tabela para o ponto de saturação e corrigindo a pressão através da Equação 5, se chega aos valores expressos na Tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades do vapor suprimindo perdas de carga.

Propriedade	Entrada na estação
Pressão (kPa)	60,7856
Temperatura (K)	359,2127

Foram observadas grandes diferenças de pressões nos manômetros ao longo da tubagem, o que indica grandes perdas de carga no caminho. Convenientemente existe um estudo acerca deste sistema presente no ambiente fabril da Continental Mabor. Este analisa a logística até a estação VS1, serão utilizados os dados apresentados neste a fim de estimar as perdas desde a aspiração por vácuo nas prensas até a bomba, assim determinando a capacidade desta, e realizando uma seleção do equipamento de forma mais precisa.

### 4.3 Tubagens

A tubagem de vácuo deverá permanecer na mesma direção e cota, a fim de garantir a mínima perda de carga neste percurso até o tanque de destino. Esta chega dos corredores transversais de vulcanização, e se unem a esta tubagem DN125, a qual deve manter o nível de altura e ter suas uniões via soldadura.

Para água de arrefecimento se necessita de uma nova linha capaz de proporcionar o caudal requerido pela instalação, para ambos, ida e retorno. Estando a ida devidamente isolada, garantindo assim que a temperatura não apresente grandes variações até a estação.

Estas linhas devem chegar ao fim do corredor pelo lado esquerdo, uma vez que não existem muitos espaços restantes no início do corredor, esta entra pelo lado esquerdo, e tubos cruzados são prejudiciais em longo prazo prejudicando possíveis adições na rede de tubagem. Sua linha de origem é uma tubagem cerca de 15 metros acima do nível 0 do pavimento industrial, e conecta as galerias subterrâneas via abertura próxima a estação VS1.

Para os condensados se tem preferência pela parte superior do corredor uma vez que se pode optar por uma bombagem inicial e o restante do trajeto gravítico. Reduzindo desta forma a pressão exigida pela bomba uma vez que evitadas perdas de carga em linha.



A linha de tubagem gravítica deve aproveitar a máxima altura possível desde a saída do tanque da estação, esta estipulada a partir dos ensaios referentes ao tanque de condensados. Ambos devem chegar até o *Blowdown*, com altura mínima de 1,5m. Fora encontrada uma lacuna na parte superior central do corredor, capaz de comportar ambos os tubos, em alternativa se tem a lateral esquerda do tanque.

Uma fotografia do corredor atual com previsões de disposição das tubagens é expressa na Figura 41, tendo de levar em conta que as tubagens respectivas ao vácuo e ambas as linhas de ar comprimido já estão instaladas.

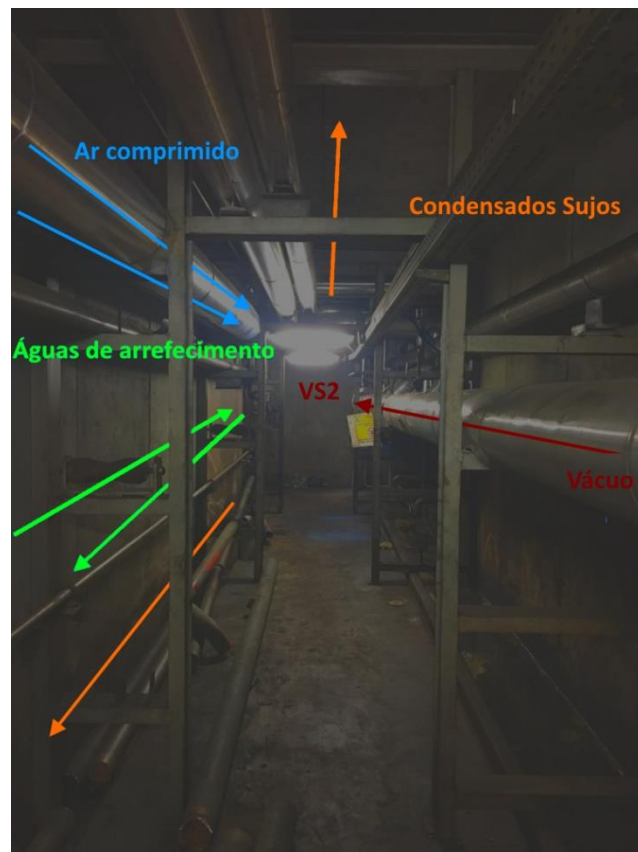


Figura 41 – Previsão da disposição das tubagens no corredor atual, sendo novas as linhas de condensados e água.

Uma pré-simulação foi realizada em 3D buscando a melhor disposição destes através da ferramenta *routing* do SOLIDWORKS, prevendo conexões e unindo entradas e saídas do sistema, a fim de otimizar seus percursos e disposições posteriormente. A modelagem em três dimensões é expressa na Figura 42, esta inclui representação de um operador, a fim de garantir ergonomia e espaço livre para circulação e acesso aos componentes.



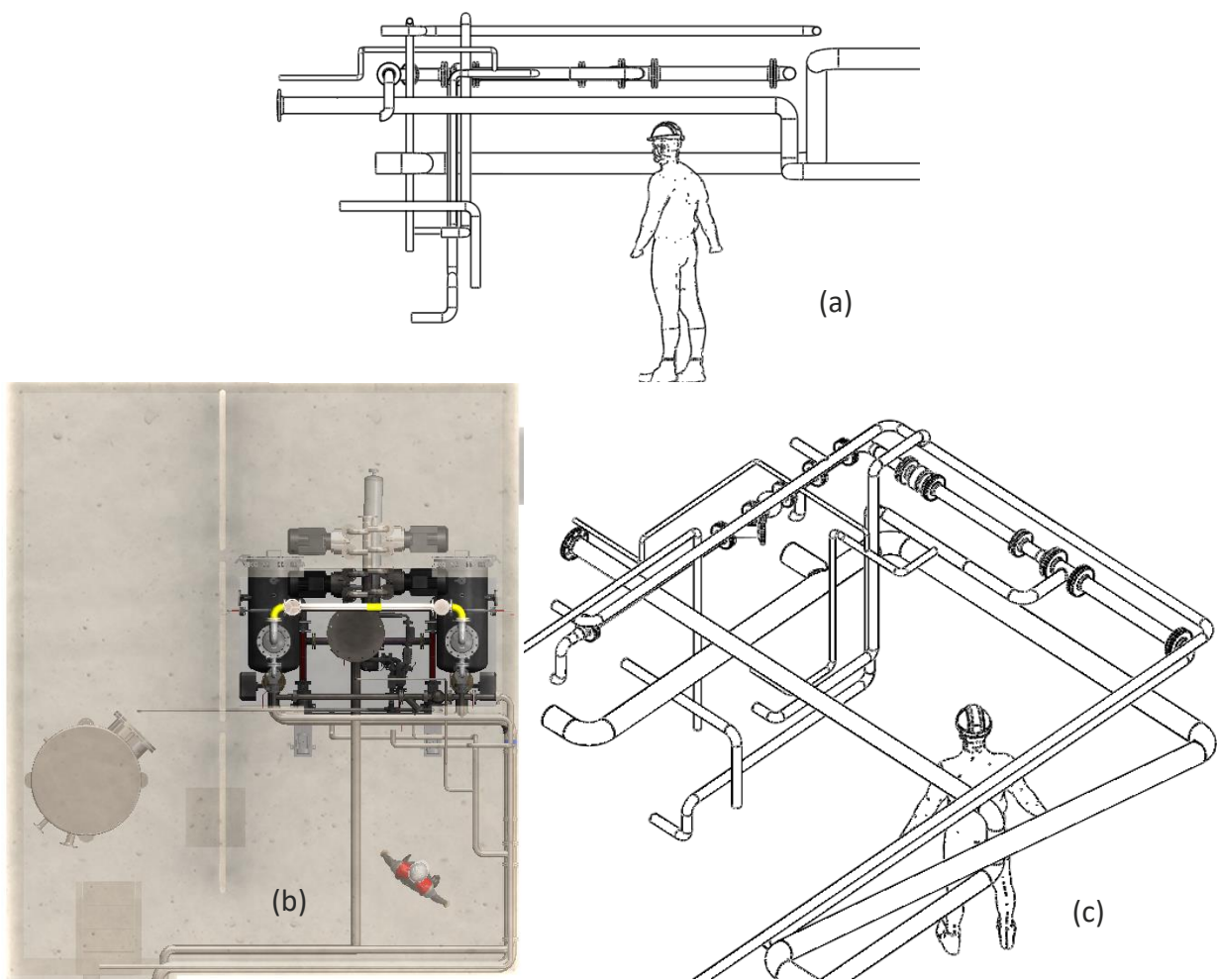


Figura 42 - Simulação de tubagens, (a) vista lateral, (b) vista superior e (c) vista em perspectiva.

Os desvios se mostraram uma boa opção para a disposição das tubagens, pois permite uma boa ergonomia e acesso aos componentes essenciais da estação, porém ainda resulta em conflitos onde uma ramificação intercepta outra. Esta simulação possibilita estimar a extensão, além de posicionar reduções, válvulas e caudalímetros. O desenvolvimento deste estudo será realizado conforme o desenvolver dos demais tópicos deste trabalho, a fim de analisar de forma objetiva os acoplamentos e disposição ajustada conforme necessidade de cada componente em específico.

O projeto de disposição para tubagem das águas de arrefecimento foi realizado pela empresa Auditene, apresenta 169,85 m de troço linear, enquanto para perdas localizadas duas válvulas solenóides, 4 têes de derivação, 31 e 26 curvas para fornecimento e retorno respetivamente. Os parâmetros aplicados para cálculo foram densidade de  $1000 \text{ kg/m}^3$ , Reynolds igual a 83042 fornecido pela Auditene, e fator de atrito de 0,0129 para o material escolhido. A partir dos dados apresentados juntamente ao diâmetro conhecido de 0,08 metros, é possível encontrar uma perda de carga total, ou seja, linear somada a localizada para diferentes velocidades, a fim de visualizar a evolução da perda de carga perante este fator. As perdas de cargas totais resultantes são apontadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Perda de carga das águas de arrefecimento para diferentes velocidades.

Velocidade (m/s)	Caudal (m³/s)	Perda de carga (kPa)
1,0	0,00597	20
1,6	0,00956	60
2,0	0,01195	100
2,1	0,01255	120
2,6	0,01553	170

Fora aplicado um fator de segurança para as perdas de carga de 1,1, ou seja, 10% além de arredondamento incrementado conforme adotado pela empresa responsável. Se observam significativas diferenças para perdas de carga segundo a evolução das velocidades, desta forma tratando de uma curva quadrática, cuja pode ser observada na Figura 43.

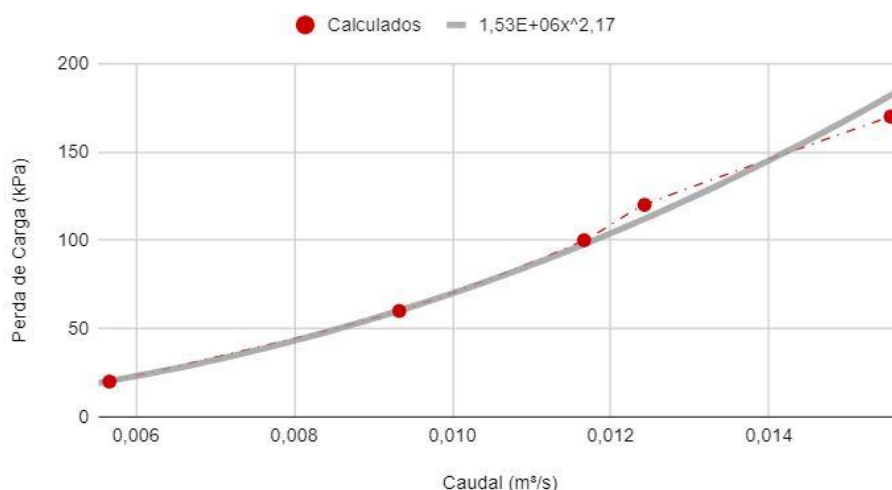


Figura 43 - Gráfico caudal x perda de carga para água de arrefecimento.

Os desvios observados são relativos às correções e arredondamentos, desta forma para a velocidade de 2,6 a perda estima está irregular, estando abaixo da curva seguida pelas demais necessitando correção. A velocidade de 2,6 será adotada devido à estipulação inicial e a fim de garantir caudal adicional para possíveis futuras expansões da estação. Com a devida correção equacionada graficamente a partir do caudal ( $\Delta P = 1,53 \cdot 10^6 \cdot q^{2,17}$ ) direcionando para a tendência, a nova perda de carga da tubagem é de 181,8594 kPa.

Tendo em vista os valores obtidos anteriormente, se obtém como pressão disponível para a estação subtraindo este dos iniciais 330 kPa uma resultante de 148,1406028 kPa, além diferença térmica estimada com o isolamento de  $\pm 2^\circ\text{C}$ , chegando assim a temperatura de 298 K.

#### 4.4 Seleção de bombas

As bombas a serem definidas podem ser separadas em dois grupos: vácuo e condensados, as de vácuo como núcleo do sistema e de condensados para separação, extração e destinação dos resíduos. O tipo de acoplamento será orientado a partir do manual adaptado expresso na Figura 44, trazendo recomendações de acordo com o as posições de fonte inicial e final para acoplamento nesta.

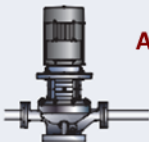
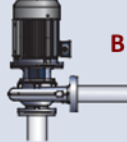
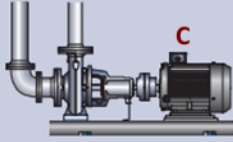














Tipo de bomba				
Acoplamentos				
Para a bomba: A partir da bomba:				
		 Em linha com acoplamento curto Montagem horizontal ou vertical	 Sucção final com acoplamento curto Montagem horizontal ou vertical	 Sucção final com acoplamento longo Montagem horizontal apenas
	Ao longo do chão 	Melhor escolha	Boa escolha	Boa escolha
	Para o chão 	Melhor escolha	Boa escolha	Boa escolha
	Para o teto 	Boa escolha	Melhor escolha	Melhor escolha
	Ao longo do chão 	Boa escolha	Melhor escolha	Má escolha
	Para o chão 	Boa escolha	Melhor escolha	Má escolha
	Para o teto 	Boa escolha	Melhor escolha	Melhor escolha
	Ao longo do chão 	Melhor escolha	Má escolha	Má escolha
	Para o chão 	Melhor escolha	Boa escolha	Boa escolha
	Para o teto 	Boa escolha	Melhor escolha	Melhor escolha
Montada na parede 	Montada na parede 	Melhor escolha	Boa escolha	Não se aplica

Figura 44 - Manual de seleção para montagem da bomba, adaptado de (Due Jensens 2004).

##### 4.4.1 Bombas de Vácuo

As bombas de vácuo a serem utilizadas serão do tipo anel líquido, pois realiza a aspiração com grande volume de água, uma vez que se trata de ar saturado húmido, acarretando assim em boas condições para o trabalho deste tipo de bomba. Considerando o caudal encontrado anteriormente de 182,88 m<sup>3</sup>/h, ainda levando em conta que existem fugas indeterminadas no sistema, acrescentando em torno de 50 m<sup>3</sup>/h de capacidade adicional para superar esta variável. Foi elencada a bomba de uma das concorrentes para a execução deste projeto, decorrente dos caudais observados. As capacidades das bombas de modelo A333 da Speck estão descritas no Anexo 4, sendo assim requerida uma bomba com parâmetros equivalentes ou superiores. Para a pressão de vácuo esperada, serão consumidos para o anel líquido em torno de 17 l/min e 6,8 kW para obtenção de caudais volúmicos entre 230 e 260 m<sup>3</sup>/h para 50 e 15 °C de anel líquido respectivamente, desta forma apresentando caudal extra a fim de prevenir perdas adicionais propiciadas por substituições de diafragmas.

#### 4.4.2 Bombas para extração de condensados

As bombas de condensados serão postas em dois pontos, uma após o tanque de separação unido ao condensador, responsável pela extração dos condensados a fim de deixar estes sob pressão atmosférica e a outra aplicação tem finalidade de apenas realocar estes condensados após nova filtragem.

Seguindo a equação citada se obtém 613,93 kg/h 0,61516 m<sup>3</sup>/h de condensados a serem depositados nos tanques, estes que estarão sob pressão relativa negativa proveniente das bombas de vácuo. Estas bombas serão responsáveis pela extração dos condensados do tanque e direcionadas a outro tanque para nova separação de particulados dos condensados. Estas bombas não precisam necessariamente estar submetidas a trabalho contínuo, assim podendo, por exemplo, ter um ciclo de funcionamento de 12 minutos por hora, mantendo o caudal e neste multiplicando por 5 o caudal a fim de manter o caudal total, desde que este ciclo respeite a capacidade limite do tanque.

##### 4.4.2.1 Bomba do tanque de vácuo

Um parâmetro importante a ser mensurado é a pressão a ser vencida, em termos de catálogos de bombas esta é medida por metros de coluna de água, neste caso equivale a pressão exercida pelo vácuo, somado a perdas de carga das tubagens e ainda a diferença de nível do reservatório inicial e o fim da tubagem. Um fator a ser considerado é a presença de particulados de até 5mm provenientes dos resíduos trazidos pelo vácuo, deste modo a bomba deve ser capaz de operar com um percentual de resíduos sólidos.

São esperados 4 metros de tubagem linear, juntamente aos acessórios: 1 tê e 3 curvas 90°, obtidos por simulação prévia em 3D. A perda linear é obtida pela equação Darcy-Weisbach, expressa na Equação 34.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (34)$$

O fator de fricção ( $f$ ) fora atribuído segundo o equacionamento de Colebrook para Reynolds considerando fluxo desenvolvido e conduta cheia acima de 4000, o equacionamento tem como ponto de partida a rugosidade relativa do tubo ( $\varepsilon/D$ ), conforme apresentado na Equação 35.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (35)$$

A velocidade foi arbitrada como 1 m/s a fim de uma baixa produção de ruído e como tubagem de saída DN 32 sendo esta a medida de saída da bomba.

Por fim, a altura em metros de coluna de água obtida é de 6 metros, a bomba selecionada deve ser capaz de superar esta com os resíduos sólidos e manter o caudal volumétrico de 0,61516 m<sup>3</sup>/h de condensados sob temperaturas em torno de 80°C.

#### 4.4.2.2 Bomba de extração

Estas possuem uma grande flexibilidade em questão de ciclos de funcionamento e ainda possui pouca pressão a superar, uma vez que esta é apenas responsável pelo transporte dos condensados de um tanque a outro, sendo ambos atmosféricos. Desta forma será utilizado o conjunto de bombas amplamente adotado pela Continental explicitado na Figura 45, onde ambas derivam da mesma tubagem, a rigor apenas uma fica em funcionamento e em caso de falha de uma das bombas, outra pode prosseguir em funcionamento enquanto a inicial passa por manutenção ou substituição.

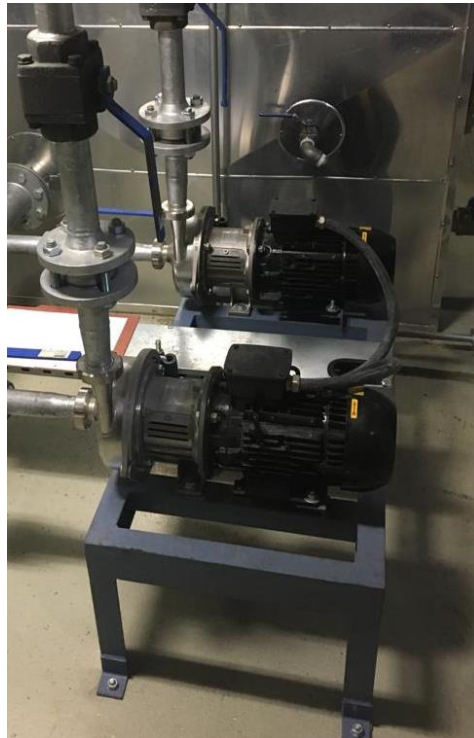


Figura 45 - Conjunto de bombas de condensados utilizado pela Continental Mabor.

Estas bombas já se encontram disponíveis para instalação, assim não havendo necessidade de maiores dimensionamentos, as especificações destas não serão divulgadas.

#### 4.5 Dimensionamento dos permutadores

Serão necessários ao menos dois permutadores de calor no processo, uma vez que em se tratando das bombas de vácuo por anel líquido, esta tem sua eficiência maximizada quanto menor a temperatura de água em seu interior. Outro permutador é necessário para condensar os resíduos que chegam pela tubulação proveniente de todas as prensas associadas.

Opção de permutador de placas fora descartado, uma vez que este se trata de um modelo de permutador em fase de desenvolvimento e ainda possui limitações a respeito de limpeza de incrustações e manutenção. O modelo de radiador por outro lado, mesmo sendo muito eficiente em se tratando de ar, pode ser um desafio ter este isolado para o vácuo e extração de condensados. A aferição destes sistemas fora

desconsiderada pela abordagem da empresa, assim fica proposta para futuros estudos de aplicação.

Definindo os permutadores de calor como carcaça e tubos, donde o vapor extraído pelo vácuo passa pelos tubos a fim de uma menor perda de carga, enquanto a água de arrefecimento passa pela carcaça. A água limpa passando pela carcaça permite uma menor frequência de manutenção devido a incrustações, enquanto os tubos do permutador onde passa o vapor podem ser conectados diretamente ao tanque, assim auxiliando no acúmulo dos condensados, ainda facilitando a limpeza deste e compactando o sistema, uma vez que este estará instalado no subterrâneo.

Outra definição visando reduzir as perdas de carga é a disposição de tubos em paralelo, assim reduzindo perdas de carga para a água de arrefecimento, sem grandes perdas de eficiência, comprovado em simulação posterior.

Como delimitadores limites, temos altura máxima de 2,5m, pois acima disso dificultaria manutenção do equipamento, além de diâmetro máximo de 0,5m, devido ao espaço na janela e custo da carcaça, que apresenta grandes variações devido ao diâmetro deste, os sistemas deverão ser adiabáticos, ou seja, isolado para que não ocorram trocas de calor com o exterior.

#### 4.5.1 Permutador W01

Responsável por manter a temperatura do selante das bombas de vácuo de anel líquido a baixas temperaturas, assim aumentando a eficiência destas. Representando inicialmente uma das principais modificações em relação a estações anteriores com um sistema fechado, ou seja, perante funcionamento normal a mesma água que passa pelas bombas retorna para estas após novo arrefecimento.

Os fluidos envolvidos serão a recirculação de água para o anel líquido das bombas de vácuo, e água de arrefecimento, ambos compartilham do mesmo calor específico, uma vez que para início e em casos extremos a água de arrefecimento alimenta diretamente o reservatório destinado ao anel líquido das bombas. O caudal para o anel líquido é conhecido, enquanto para o arrefecimento deste existe uma grande disponibilidade. Os dados de entrada conhecidos neste ponto estão expressos na Tabela 16.

Tabela 16 - Dados de entrada Permutador W01.

	Fluido Frio	Fluido Quente
Fluido	Água (Tubos)	Água (Carcaça)
Calor específico (J/kgK)	4180	4180
Temperatura Entrada (K)	299	308
Temperatura Saída (K)	-	-
Caudal mássico (kg/s)	12,4775 Disponível	0,2828



#### 4.5.1.1 Diferenças de temperaturas

Os fluidos que percorrem este equipamento são água de arrefecimento já abordada e água para o selante das bombas de anel líquido, ou seja, é um processo água-água. Segundo as Equações 3 e 4, são necessárias quatro temperaturas, porém apenas duas são conhecidas, mas uma vez conhecidas temperatura de um lado do processo. Tendo em vista que quando menor a temperatura de anel líquido, maior o caudal obtido por esta, o permutador será calculado para uma alta transferência com apenas o incremento de 1 °C, ou seja saída da água para as bombas de 26°C. A temperatura faltante pode ser obtida através da Equação 36, uma vez que o calor trocado entre os fluidos correspondem entre si ( $Q_q = Q_f$ ).

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (36)$$

O  $c_p$  da água é conhecido com o valor de 4180 J/kgK, enquanto sua diferença de temperaturas é obtido por:

$$\Delta T = 308 - 299 = 9 \text{ K}$$

Adicionado ao caudal mássico encontrado anteriormente igual a 0,2828kg/s (extraído do caudal volúmico de 17l/min), desta forma a energia térmica resultante é de 10.639,81 J/s. Manipulando a Equação 36 levando em conta que  $Q_q = Q_f$ , se obtém a Equação 37 para encontrar a temperatura faltante no sistema.

$$(\dot{m} c_p \Delta T)_q = (\dot{m} c_p \Delta T)_f \quad (37)$$

Manipulando a equação anterior é possível determinar o caudal do outro fluido em função de sua diferença de temperatura.

$$\dot{m}_f = \frac{Q_q}{c_{p_f} \Delta T_f} = \frac{10639,81}{4180(T_{f_1} - 298)}$$

Desta forma, quanto menor a temperatura de saída maior o caudal utilizado, assim sendo inversamente proporcionais, porém, conforme analisado quanto maior o caudal, menor o diferencial logarítmico e consequentemente menor a área de troca necessária, assim reduzindo custos, desta forma será adotada um delta de temperatura baixo, neste caso igual a 2 K correspondendo a uma temperatura de saída de 300 K, assim obtendo um caudal de 1,2727kg/s o que corresponde apenas a 10,2% do caudal de água de arrefecimento disponível para a instalação.

Disposto em contracorrente para realização de uma boa troca e aproximação entre as temperaturas dos fluidos quente e frio. O diferencial logarítmico para permutador em contracorrente pode ser obtido através da aplicação da Equação 4, assim encontrando um diferencial logarítmico igual a 3,366289 K. O diferencial logarítmico necessita de uma correção de acordo com a configuração de passes, este pode ser obtido graficamente com o auxílio do Anexo 2 com os coeficientes P e R, obtidos pela aplicação das equações 5 e 6 respetivamente, obtendo desta forma P = 0,2 e R = 4,5, estes por sua vez, relacionados ao caso 2 apresenta um fator de correção (F) de 0,9, enquanto para o caso 1 de 0,4, a área de troca aumenta proporcionalmente a redução do diferencial, o qual é multiplicado pelo fator de correção, desta forma

selecionado o caso 2. O diferencial logaritmico de temperaturas corrigido ( $\Delta T_{ln}^*$ ) resulta no valor de 3,02966 K, com este é possível dar sequência ao dimensionamento.

Tabela 17 - Parâmetros obtidos para o permutador W01.

Parâmetro (unidade)	Valor	Origem
Calor Trocado (J/s)	10.639,81	Equação 36
Temperatura de saída do fluido quente (K)	299	Análise
Temperatura de saída do fluido frio (K)	300	Análise
Caudal mássico do fluido frio (kg/s)	1,2727	Equação 37
Diferencial Logaritmico	3,3663	Equação 4
Parâmetro P	0,2	Equação 5
Parâmetro R	4,5	Equação 6
Fator de correção	0,95	Anexo 2
Diferencial Logaritmico corrigido	3,1979	-

#### 4.5.1.2 Parâmetros geométricos

Para o pré-dimensionamento serão adotados como coeficientes de transferência de calor, valores aproximados para análise preliminar de acordo com o fluido, estes que serão atualizados servindo de base para o dimensionamento definitivo. Os coeficientes de transferência para tubos e na carcaça,  $h_t$  e  $h_c$  respetivamente, serão considerados ambos 5000 W/(m<sup>2</sup>K) por se tratarem ambos os fluidos de água. O material da carcaça será considerado o aço carbono ST37, o qual apresenta condutibilidade térmica ( $k$ ) igual a 58 W/(mK) quando exposto a temperaturas de 100 °C.

Segundo a norma TEMA, os diâmetros mais comuns e suas respectivas aplicações são listados na Tabela 18.

Tabela 18 - Medidas comuns de tubos para diferentes casos (TEMA 2007).

Medida (polegada = 0,0254 metros)	Caso
1/4	Fluidos limpos
3/8	
1/2	
5/8	
<b>3/4</b>	Limpeza mecânica
7/9	
1	Incrustações
1,25	
1,5	
2	



Os fluidos de trabalho podem ser considerados limpos, porém existe a possibilidade de pequenas quantidades de resíduos passarem pelos outros permutadores até a bomba e consequentemente ao tanque que alimenta este. Ainda pode ocorrer um mau tratamento da água de arrefecimento, desta forma necessitando de limpezas mecânicas periódicas como relatado em outra unidade. Assim sendo adotado o diâmetro de 3/4 de polegada. Os valores adotados para o pré-dimensionamento são expostos na Tabela 19.

Tabela 19 - Dados preliminares para o dimensionamento W01.

Parâmetro (unidade)	Valor
Diâmetro externo do tubo, m	0,019
Diâmetro interno do tubo, m	0,016
Condutibilidade, W/(m <sup>2</sup> K)	58
Passo dos tubos, m	0,0254
Comprimento do permutador, m	1
Coeficiente de transferência de calor na carcaça, W/(m <sup>2</sup> K)	5000
Coeficiente de transferência de calor nos tubos, W/(m <sup>2</sup> K)	5000
Resistência a incrustação	0,000126
Resistência nas alhetas	0

Uma vez que as alhetas foram desconsideradas para este equipamento, sua resistência será considerada nula. Com os valores obtidos é possível determinar os parâmetros dimensionais do equipamento, conforme explicitado na Tabela 20.

O diâmetro equivalente para disposição quadrangular pode ser obtido através da Equação 38.

$$D_e = \frac{4 \cdot (P_T^2 - \pi \frac{d_e^2}{4})}{\pi d_e} \quad (38)$$

Tabela 20 - Parâmetros dimensionais do permutador W01.

Parâmetro (unidade)	Valor	Origem
Coeficiente global de transferência de calor, W/(m <sup>2</sup> K)	1349,0	Equação 11
Área de transferência de calor, m <sup>2</sup>	2,4660	Equação 9
<i>Pitch Ratio</i>	1,3368	Equação 8
Diâmetro da carcaça, m	0,1943	Equação 5
Número de tubos	42	Equação 6
Número de chicanas	8	Equação 7
Diâmetro equivalente, m	0,0242	Equação 38

Espaço entre os tubos, m	0,0064	$P_T - d_e$
Corte do defletor	0,2	Convencional

O corte do defletor foi adotado como o mais comum, uma vez que conceitualmente não trás tantas perdas de carga, e para o espaço entre tubos, apenas subtraído o diâmetro externo do passo entre os tubos.

A temperatura da parede pode ser obtida a partir de uma média entre as médias de temperaturas para o fluido quente e o frio, sendo neste caso 301,25 K. Também são necessárias para a próxima etapa algumas propriedades dos fluidos, como densidade ( $\rho$ ), número de Prandtl ( $Pr$ ), condutibilidade ( $k$ ), e viscosidade dinâmica ( $\mu$ ). Estes obtidos das tabelas correspondentes a suas temperaturas médias (entrada e saída de cada fluido), sendo estas 299 K e 303,5 K para fluido frio e quente respectivamente. A condutividade se mantém aproximadamente igualada em 0,607 W/(mK), enquanto para densidade os valores obtidos foram 996,78 e 995,44 kg/m<sup>3</sup>, Prandtl de 6,178 e 4,805, e viscosidade de 0,899 e 0,725 mPa.s para os fluidos frio e quente respectivamente (Incropera and DeWitt 2008). Assim, resultando também na viscosidade média da parede da carcaça, obtida a partir de ambas as citadas anteriormente, com o valor de 0,813 mPa.s.

No espaço denominado de transição, se obteve que a Área de transição ( $A_{tp}$ ) equivale a 0,00416 m<sup>2</sup> com a Equação 21, esta que equivale à área de seção somada dos tubos e a velocidade de transição ( $v_m$ ) respectiva a esta área é de 0,307 m/s com a aplicação da Equação 20. Os valores para perdas de carga e correções obtidas através dos dados levantados anteriormente, juntamente a mais parâmetros essenciais para os cálculos são resumidos e apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Perdas de carga e correções para o permutador W01.

Parâmetro (unidade)	Valor	Origem
Área de fluxo cruzado, m <sup>2</sup>	0,0098	Equação 17
Velocidade mássica na carcaça, kg/(s m <sup>2</sup> )	28,882	Equação 18
Fator de correção na carcaça	0,4821	Equação 22
Fator de correção nos tubos	0,0094	Equação 23
Perda de carga na carcaça, Pa	8,0766	Equação 13
Perda de carga nos tubos, Pa	596,734	Equação 14
Número de Reynolds na carcaça	964,811	Equação 16
Número de Reynolds nos tubos	5444,47	Equação 19
Número de Nusselt nos tubos	42,1766	Equação 25
Coeficiente de transferência de calor na carcaça corrigido, W/(m <sup>2</sup> K)	652,00	Equação 15
Coeficiente de transferência de calor nos tubos corrigido, W/(m <sup>2</sup> K)	1555,26	Equação 24

A relação entre as novas áreas ( $A_f/A_c$ ) obtidas com os novos coeficientes de transferência de calor é de 1,12 (8,486/7,569), ou seja, abaixo de 1,35 conforme recomendação, desta forma sendo satisfatória (Kakaç et al. 2012). Então é possível obter o dimensionamento final deste equipamento através dos coeficientes de transferência de calor corrigidos, apenas realizada uma correção para obtenção de um permutador com relação 1/4 referente a diâmetro por comprimento. Os resultados finais obtidos são expressos na Tabela 22.

Tabela 22 - Dimensões finais do permutador W01.

Parâmetro (unidade)	Valor	Origem
Coeficiente global de transferência de calor, $W/(m^2 K)$	392,02	Equação 11
Área de transferência de calor, $m^2$	8,4862	Equação 9
Diâmetro da carcaça, m	0,25	Equação 5
Comprimento da carcaça, m	1	Estudo espaço
Número de tubos	69	Equação 6
Número de chicanas	6	Equação 7
Perda de carga corrigida na carcaça, Pa	6,602	Equação 13
Perda de carga corrigida nos tubos, Pa	231,8	Equação 14

#### 4.5.2 Permutadores W02 e W03

Como são sistemas redundantes, ambos os permutadores W02 e W03 serão idênticos, sendo que inicialmente e sob condições normais, apenas um destes estará em funcionamento. Será seguido o mesmo padrão de metodologia aplicado para o permutador W01.

Tendo apenas uma passagem para cada fluido, visando menos perdas de cargas, nominalmente o vácuo a passar pelos tubos tendo perdas ainda menores, enquanto água de arrefecimento passa pela carcaça. Também em disposição contracorrente e instalado na vertical, de forma a acumular os condensados em um tanque acoplado na extremidade inferior do permutador. A esquemática deste é expressa na Figura 46, explicitando entradas e saídas.

Os tubos adotados também serão de 3/4 polegadas, apesar de serem previstas incrustações, a limpeza mecânica já é periódica nos demais permutadores existentes na instalação e também sendo um requisito interno para este.

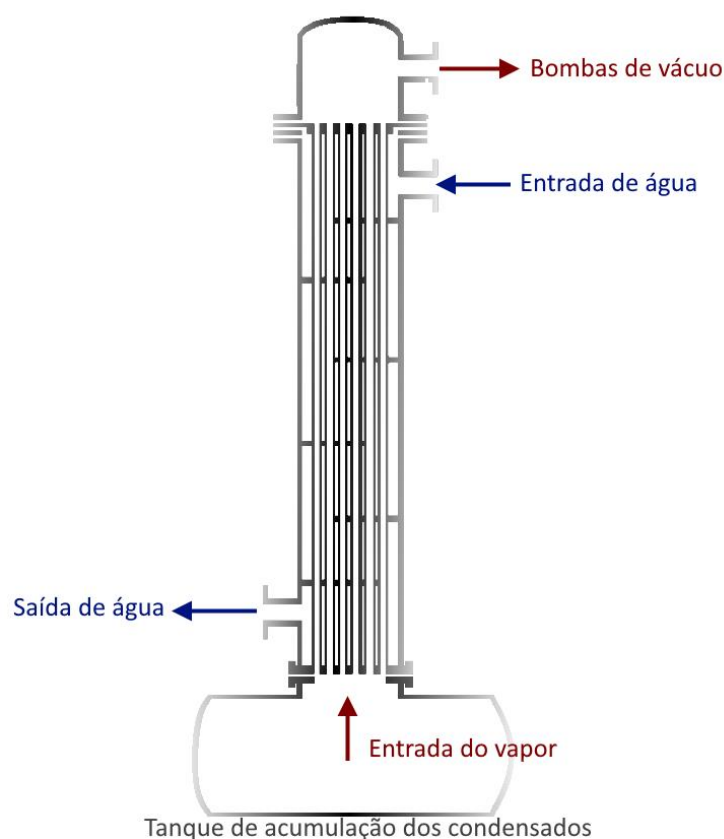


Figura 46 - Representação esquemática dos permutadores W02 e W03.

#### 4.5.2.1 Diferenças de temperaturas

O caudal de vapor a ser extraído pelo vácuo já é conhecido, sendo calculado para as quatro bombas, enquanto o caudal da água de arrefecimento será considerado metade do disponível, descontado a parcela destinada ao W01, a fim de promover uma boa troca de calor e ainda possibilitando futuramente o funcionamento em simultâneo dos permutadores W02 e W03. Por requisito do MES, com secções expostas no Anexo 1, após passar por estes permutadores, o vácuo deve estar a 30 °C, equivalente a 303 K. Os dados de entrada conhecidos são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Dados de entrada dos permutadores W02 e W03.

	Fluido Frio	Fluido Quente
Fluido	Água	Vapor saturado
Calor específico (J/kgK)	4180	1880
Temperatura Entrada (K)	299	353
Temperatura Saída (K)	-	303
Caudal mássico (kg/s)	5,6024	0,2667

A partir dos dados abordados anteriormente, é possível encontrar a potência calorífica do equipamento, aplicando a Equação 36 para o fluido quente, que se tem conhecidos os parâmetros envolvidos, assim obtendo que:

$$Q = 0,2667 \cdot 1880 \cdot (353 - 303)$$

Desta forma se obtém que o calor trocado é de 25,067 kJ/s, com este parâmetro é possível calcular outros importantes para o desenvolvimento do estudo, estes são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Parâmetros obtidos para o permutador W02.

Parâmetro (unidade)	Valor	Origem
Calor Trocado (kJ/s)	25,067	Equação 36
Temperatura de saída do fluido frio (K)	299,07	Equação 37
Diferencial Logaritmico	20,574	Equação 4
Parâmetro P	0,0195	Equação 5
Parâmetro R	46,712	Equação 6

Devida à disposição selecionada de passes únicos na carcaça e nos tubos, não há necessidade de aplicar correções ao diferencial logarítmico, uma vez que este fator de correção tende assintoticamente a 1 respetivamente ao elevado parâmetro R obtido.

#### 4.5.2.2 Parâmetros geométricos

Os tubos utilizados serão do mesmo tipo adotado para o permutador W01, e o mesmo acontecerá com os materiais respetivos a carcaça. O parâmetro  $h_c$  inicial se mantém se mantém igual a 5000 W/(m<sup>2</sup>K) em se tratando do mesmo fluido abordado anteriormente, enquanto que para o  $h_t$  inicial será adotado 8000 W/(m<sup>2</sup>K) correspondente ao vapor de condensação. O material da carcaça será considerado o mesmo, aço carbono ST37 já mencionado anteriormente com condutibilidade térmica igual a 58 W/(mK), e seu comprimento será o máximo previsto, uma vez que a instalação estará disposta em dois pisos, a altura deste não será um problema. Os valores comentados e adotados para o pré dimensionamento são expostos na Tabela 25.

Tabela 25 - Dados preliminares para o dimensionamento W02.

Parâmetro (unidade)	Valor
Diâmetro externo do tubo, m	0,019
Diâmetro interno do tubo, m	0,016
Condutibilidade, W/(m <sup>2</sup> K)	58
Passo dos tubos, m	0,0254

Tabela 25 (continuação) – Dados preliminares para o dimensionamento W02.

Comprimento do permutador, m	2,4
Coeficiente de transferência de calor na carcaça, $W/(m^2 K)$	5000
Coeficiente de transferência de calor nos tubos, $W/(m^2 K)$	8000
Resistência a incrustação	0,000126
Resistência nas alhetas	0

Novamente desconsiderando o uso de alhetas e consequentemente descartando sua resistência. Com os valores obtidos é possível determinar os parâmetros dimensionais do equipamento, conforme explicitado na Tabela 26. Ressaltando que os valores apresentados correspondem aos cálculos com incrustações, visto que mesmo com a limpeza mecânica periódica, o acúmulo destas se dá de forma rápida, sendo assim o funcionamento normal deste.

Tabela 26 - Parâmetros dimensionais do permutador W02.

Parâmetro (unidade)	Valor	Origem
Coeficiente global de transferência de calor, $W/(m^2 K)$	1533,25	Equação 11
Área de transferência de calor, $m^2$	0,7946	Equação 9
<i>Pitch Ratio</i>	1,3368	Equação 8
Diâmetro da carcaça, m	0,07	Equação 5
Número de tubos	6	Equação 6
Número de chicanas	57	Equação 7
Diâmetro equivalente, m	0,0242	Equação 38
Espaço entre os tubos, m	0,0064	$P_T - d_e$
Corte do defletor	0,2	Convencional

A temperatura da parede pode ser obtida a partir de uma média entre as médias de temperaturas para o fluido quente e o frio, sendo neste caso 313,27 K. Também são necessárias para a próxima etapa algumas propriedades dos fluidos, como densidade ( $\rho$ ), número de Prandtl ( $Pr$ ), condutibilidade ( $k$ ), e viscosidade dinâmica ( $\mu$ ). Estes obtidos das tabelas correspondentes a suas temperaturas médias (entrada e saída de cada fluido), sendo estas 298,54 K e 328 K para fluido frio e quente respectivamente. As condutividades obtidas correspondem a 0,015 e 0,607 W/(mK), enquanto para densidade os valores obtidos foram 0,3657 e 996,78 kg/m<sup>3</sup>, Prandtl de 67,015 e 6,178, e viscosidade de 0,899 e 0,524 mPa.s para os fluidos frio e quente respectivamente (Incropera and DeWitt 2008). Assim, resultando também na viscosidade média da parede da carcaça, obtida a partir de ambas as citadas anteriormente, com o valor de 0,715 mPa.s.

No espaço denominado de transição, fora encontrado que a Área de transição ( $A_{tp}$ ) equivale a  $0,00056 \text{ m}^2$  com a Equação 21, esta que equivale à área de seção somada dos tubos e a velocidade de transição ( $v_m$ ) respectiva a esta área é de  $1307 \text{ m/s}$  com a aplicação da Equação 20. Os valores para perdas de carga e correções obtidas através dos dados levantados anteriormente, juntamente a mais parâmetros essenciais para os cálculos são resumidos e apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Perdas de carga e correções para o permutador W02.

Parâmetro (unidade)	Valor	Origem
Área de fluxo cruzado, $\text{m}^2$	0,0035	Equação 17
Velocidade mássica na carcaça, $\text{kg}/(\text{s m}^2)$	1587,3	Equação 18
Fator de correção na carcaça	0,2345	Equação 22
Fator de correção nos tubos	0,0071	Equação 23
Perda de carga na carcaça, Pa	749,31	Equação 13
Perda de carga nos tubos, Pa	3694,9	Equação 14
Número de Reynolds na carcaça	42789	Equação 16
Número de Reynolds nos tubos	14591	Equação 19
Número de Nusselt nos tubos	254,02	Equação 25
Coeficiente de transferência de calor na carcaça corrigido, $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	6031,7	Equação 15
Coeficiente de transferência de calor nos tubos corrigido, $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	233,38	Equação 24

A relação entre as novas áreas ( $A_f/A_c$ ) obtidas com os novos coeficientes de transferência de calor é de 1,052 ( $6,772/6,436$ ), ou seja, abaixo de 1,35 conforme recomendação, desta forma sendo satisfatória (Kakaç et al. 2012). Então é possível obter o dimensionamento final deste equipamento através dos coeficientes de transferência de calor corrigidos, apenas realizada uma correção para obtenção de um permutador com relação 1/8 referente a diâmetro por comprimento, neste caso adotado por se tratar de uma torre vertical. Os resultados finais obtidos são expressos na Tabela 28.

Tabela 28 - Dimensões finais do permutador W02.

Parâmetro (unidade)	Valor	Origem
Coeficiente global de transferência de calor, $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	179,92	Equação 11
Área de transferência de calor, $\text{m}^2$	6,7716	Equação 9
Diâmetro da carcaça, m	0,263	Equação 5
Comprimento da carcaça, m	2,1	Estudo espaço
Número de tubos	78	Equação 6
Número de chicanas	13	Equação 7
Perda de carga corrigida na carcaça, Pa	272,07	Equação 13
Perda de carga corrigida nos tubos, Pa	29,175	Equação 14

## 4.6 Tanques

Seguindo a ordem proposta na metodologia, cada tanque será analisado em sua particularidade levando em conta suas distintas aplicações e experiências com equipamentos semelhantes e de mesma aplicação.

### 4.6.1 Ciclo do selante A01

Este seguirá o padrão descrito em documentos com níveis de confidencialidade, alterando apenas seu volume para condizer com o caudal exigido pelas bombas respectivas ao caudal de vácuo requisitado neste sistema.

Capacidade expandida para 200 litros de volume total, uma vez que apenas metade de seu volume é útil e visando aprimoramentos, 4 bombas juntas requerem um caudal 68 l/h. Adicionando ainda uma parcela de água que é desperdiçada a fim de renovação em cada ciclo, o tanque será capaz de suportar a estação em capacidade máxima, além de permitir também manutenção prolongada.

Os suportes serão laterais garantindo um melhor aproveitamento do seu entorno pelos demais componentes, a construção deste pode ser realizada em aço carbono revestido, mas preferencialmente em aço inoxidável. Este é pensado como tanque atmosférico e saída alinhada com o centro das bombas de vácuo a fim de não sobrecarregar estas. Acoplamentos destinados a colector que interliga as bombas, saída inferior destinada ao permutador no ciclo das bombas e saída de drenagem, além da aplicação de um visualizador de nível a fim da manutenção deste. A representação 3D agregando os conceitos aqui citados está representada na Figura 47.

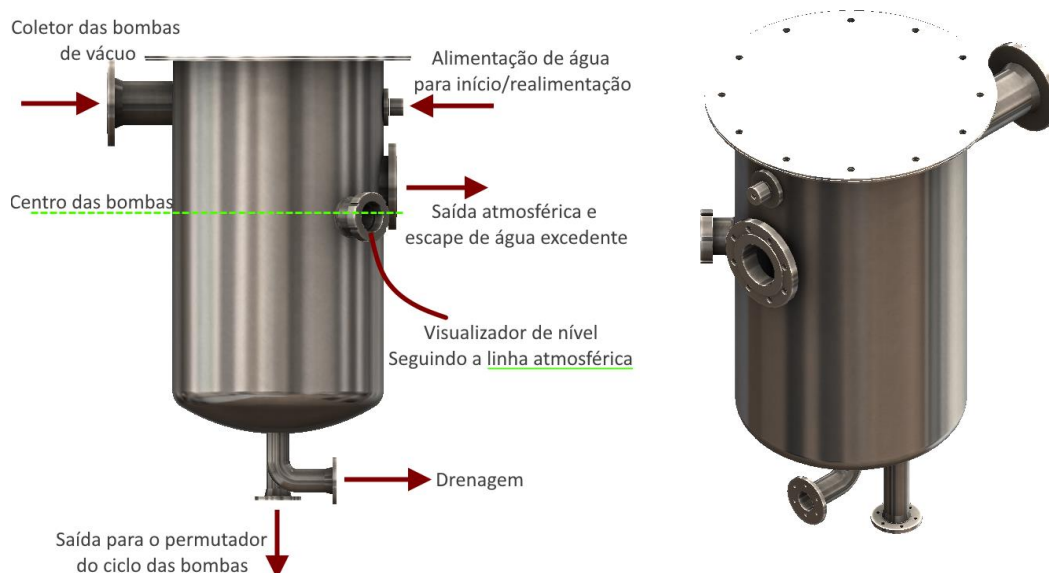


Figura 47 - Tanque de alimentação das bombas de vácuo. Esquemática em plano direito (esquerda) e vista isométrica (direita).



#### 4.6.2 Separação de condensados A02 e A03

Seguindo o padrão requisitado pelo MES, este manterá suas características, exceto pelo incremento de volume, uma vez que este em outra unidade fabril possui necessidade de frequente manutenção devido aos resíduos acumulados ao fundo do tanque. O formato e características como fecho e conexões já são definidos, restando apenas o incremento de volume, proporcionando uma frequência de manutenção duas vezes menor, implicando apenas no incremento em seu diâmetro e consequentemente altura final do permutador de calor.

O documento citado no Anexo 1 se refere à aplicação 1,7 litros por prensa, totalizando assim para as 150 prensas, 255 litros, assim atualizando o volume deste para 510 litros, visando futuras atualizações este tanque pode suportar até 300 prensas utilizando de duas bombas de vácuo. Enquanto apenas uma bomba ativa, este tanque de volume expandido permite manutenções periódicas de limpeza com maiores intervalos, na estação de referência ocorre entre uma e uma semana e meia, assim para este equipamento se terá frequência de duas e três semanas. Este deverá ter sua construção em material resistente a incrustações devido ao acúmulo de resíduos e níveis acumulados de condensados, sugeridamente aço inox e suporte em chapas de 5 a 6 milímetros, ainda aplicada válvula atmosférica para manutenções e acoplamentos de prontidão para permutador e extração dos condensados. A consolidação das propostas aqui expostas em modelagem tridimensional é apresentada na Figura 48.

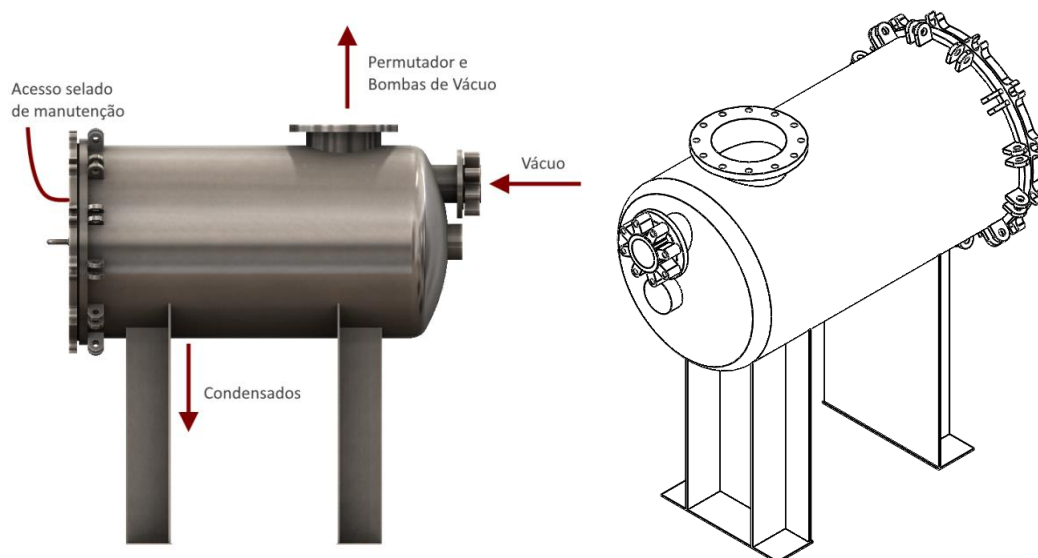


Figura 48 - Tanque de separação dos condensados, esquemática (esquerda) e vista isométrica (direita).

#### 4.6.3 Extração de condensados A04

Um tanque responsável pela acumulação das partículas sólidas é requisitado a fim de proporcionar a limpeza da água além de identificar e quantificar estes resíduos. Este deve ter como características capacidade de  $2\text{m}^3$  (a partir do MES). As limitações deste são altura e diâmetro, respetivos a profundidade da galeria e as dimensões da janela, uma vez que todos os equipamentos serão transpassados por ela.

Uma simulação inicial foi realizada concebendo o tanque verticalmente, uma vez que este tende a acumular muitos resíduos sólidos, estes a serem comportados pela parte inferior cônica, incluindo porta de visita e abertura atmosférica. O volume útil é considerado acima da parte cônica, e seu diâmetro de 1,35 m (ainda com folgas perante a abertura de 1,5 m) perante a um bom aproveitamento da profundidade da galeria. A pré-simulação concebida é apresentada na Figura 49.



Figura 49 – Vista isométrica (esquerda) e dimensões (direita) do estudo preliminar perante o Tanque A04.

Tendo sua estrutura mesclando aço carbono e aço inoxidável, aplicando ainda uma entrada DN32 para os condensados provenientes da estação, saída DN80 (tubagem reaproveitada) gravítica superior, em caso de as bombas falharem e este chegar a seu limite de capacidade, e DN150 para drenagem a fim de evitar entupimentos uma vez que se podem acumular muitos resíduos sólidos de até 5 mm dependendo a frequência de limpeza, e por fim DN 80 para bombagem dos condensados ao lado da drenagem. Sugeridamente por fabricantes os suportes foram substituídos por perfis circulares, e revestimento térmico deve ser aplicado no local devido à logística. A disposição dos acoplamentos foi definida via análise dinâmica em vista superior no espaço.

A resultante em desenho tridimensional é exposta Figura 50, ainda incluindo sensores de nível em 5 distintas posições, cada qual corresponde a 0,5 m<sup>3</sup> mais o nível zero.

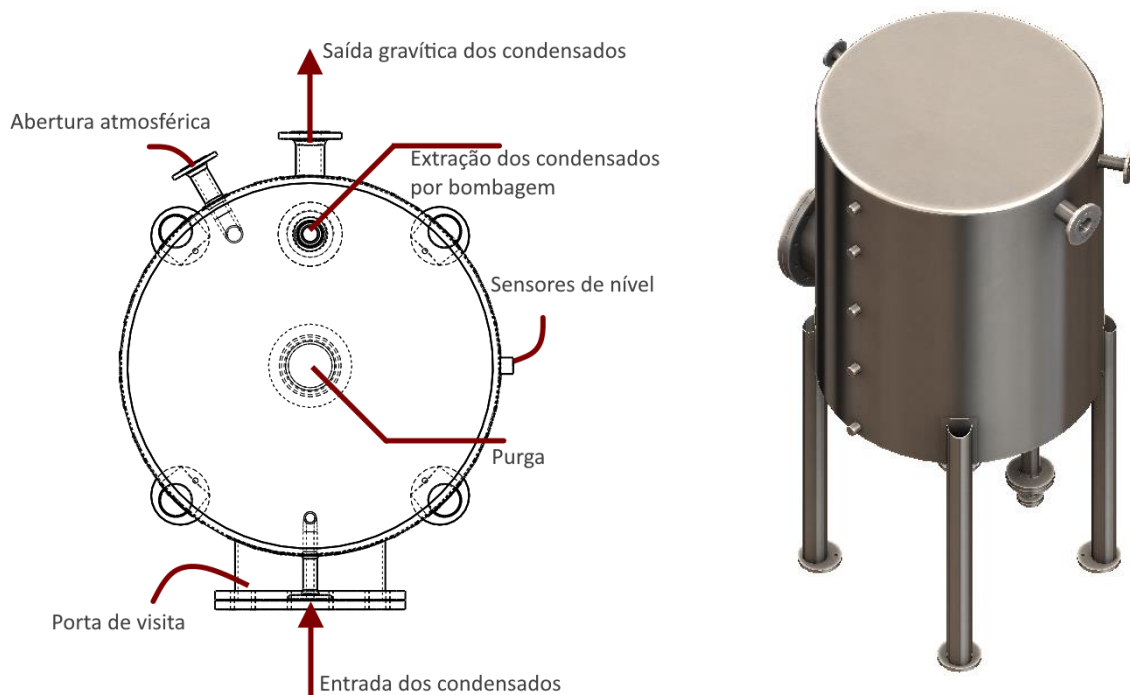


Figura 50 – Tanque A04, esquemática em vista superior (esquerda) e vista em perspectiva (direita).

## 4.7 Adequações da empresa

### 4.7.1 Pinturas

Após devidamente modelados, os componentes precisam ainda seguir o padrão de cores utilizado na empresa, a aplicação destas nas representações são exibidas nos capítulos seguintes e a relação de cores esta listada a seguir:

- Tubagem de água – verde;
- Tubagem de vácuo – cinza;
- Tubagem de ar comprimido – azul;
- Tubagem de condensados sujos – marrom;
- Motores de bombas – preto;
- Componentes e reservatórios térmicos (permutadores e tanques) – Tintura com propriedades isolantes em cinza;
- Componentes estruturais – azul;
- Proteções e guias – amarelo;
- Manípulos de válvulas – vermelho.

#### 4.7.2 Proteções

Proteções padronizadas devem ser adotadas para a estação. Neste caso por se tratar de uma instalação presente entre dois pisos fazem-se necessárias ainda proteções altas buscando dificultar quedas por acidentes. Devida a localização também é obrigatório devido à posição entre corredores de alta circulação de carros proteções baixas e reforçadas, assim evitando, como por exemplo, uma invasão do espaço por uma empilhadeira. Ainda necessárias proteções em torno da escada, evitando quedas de colaboradores e queda indesejada de objetos grandes no local de circulação, podendo estas se enquadrar no mesmo padrão de proteções altas já citadas.

Uma simulação das proteções foi realizada buscando visualização do projeto final, como apresentado na Figura 51.

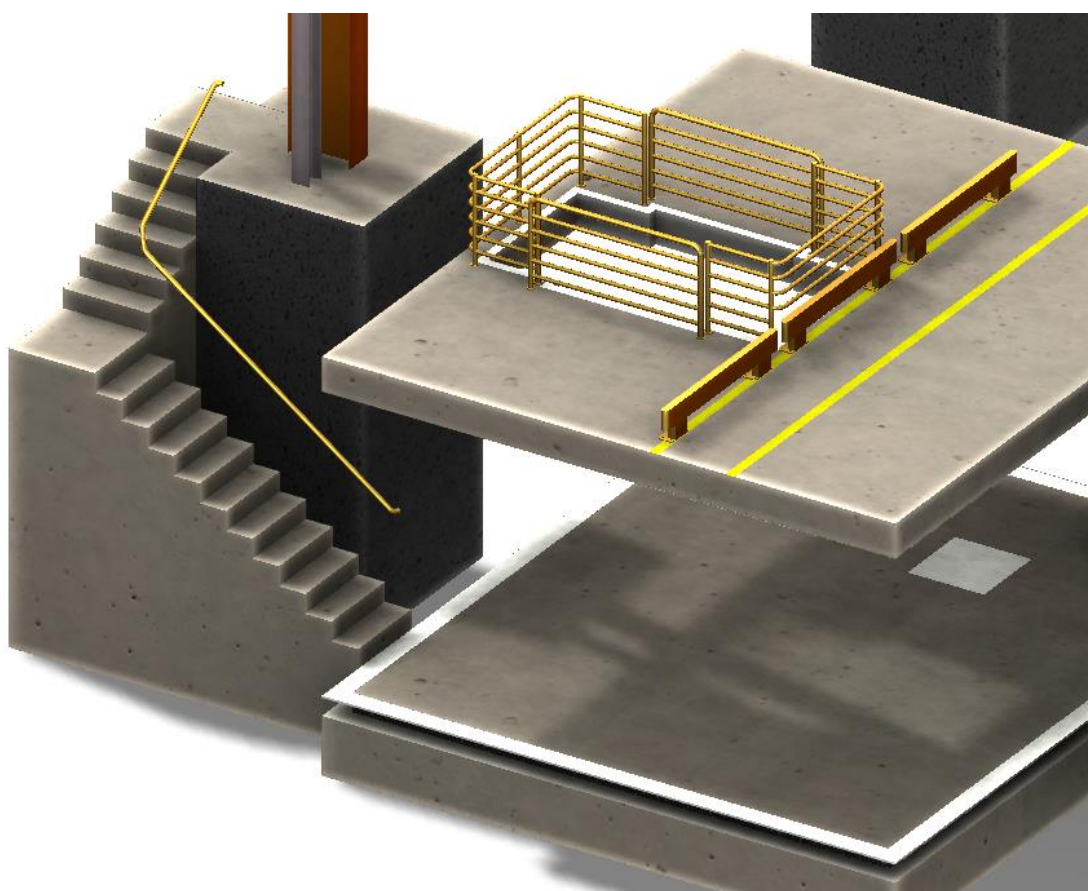


Figura 51 - Simulação das proteções físicas.

#### 4.8 Diagrama da estação

Um diagrama pode ser realizado sob os padrões de *piping and instrumentation diagram (P&ID)*, este que consiste em um diagrama utilizado para processos industriais

resumindo e compilando informações de manufatura do equipamento, instalação, comissionamento, ligação e operação da planta. (Toghraei 2019)

Este diagrama trará consigo toda a instrumentação necessária, além de separação dos módulos de quadros elétricos por grupos de componentes, além de claro todos os componentes essenciais e suas principais especificações, ligações por tubagens, e indicações de sentido de fluxo. Inicialmente tem finalidade de proporcionar uma visão geral do processo, orientar os fornecedores e por fim servir como escopo para um layout de monitoramento e controle central por PID (proporcional integral derivativo), responsável por agir em prol de um funcionamento acerca de parâmetros pré-determinados além de alertar perante grandes inconformidades nas leituras dos instrumentos em relação ao esperado.

O diagrama elaborado segue padrões usuais para representação de válvulas, linhas de tubagem e bombas. Este foi dividido entre três grupos respectivos a proximidade dos equipamentos em espaço físico, cada um destes grupos designados a um módulo elétrico, e no caso do grupo 3, também uma UTA (Unidade de Tratamento de Ar) para as linhas de ar comprimido. O projeto elétrico da estação decorreu em paralelo a este sendo estes complementares, toda a parte de sensoriamento foi referenciada no PI&D juntamente a todas as válvulas de operação e segurança pensadas para funcionamento normal e erros de operação, sendo estas solenóides e proporcionais com indicador de posição para as mais críticas, conforme representado na Figura 53, enquanto as representações de válvulas são apresentadas na Figura 52.

A lista de nomenclaturas dos componentes juntamente a denominação por grupo é listada na Tabela 29.

Tabela 29 - Lista de nomenclaturas dos principais componentes da instalação.

Nomenclatura	Componente	Grupo
B01 – B04	Bombas de vácuo	1
A01	Tanque de descarga das bombas	
W01	Permutador para anel líquido	
A02 – A03	Tanques de condensados	2
W02 – W03	Permutadores para vácuo	
B05 – B06	Bombas de extração dos condensados	3
A04	Tanque de filtragem dos condensados	
B06 – B07	Bombas de condensados	

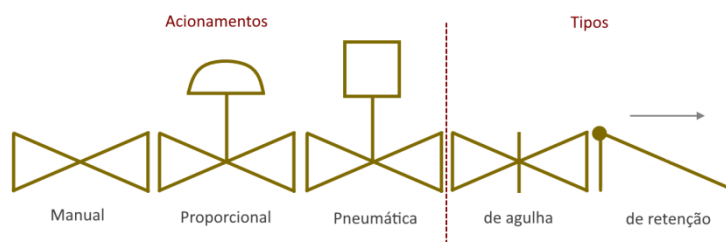


Figura 52 - Representação das válvulas.



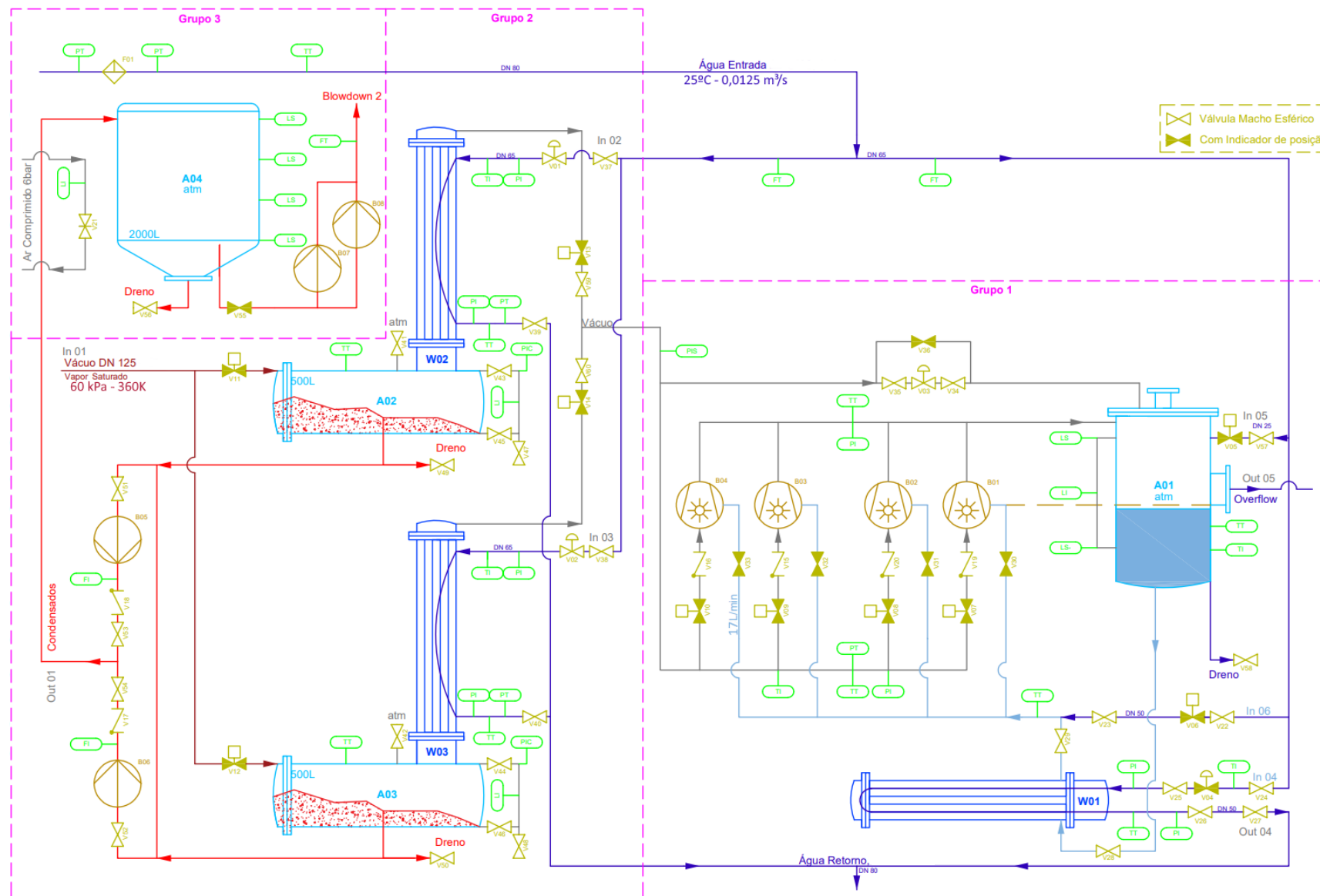


Figura 53 - Diagrama PI&amp;D global do sistema.





#### 4.9 Desenho 3D da estação

A parte estrutural foi pensada de forma simplificada e separada de forma modular, para caso sejam necessárias grandes alterações e também garantindo que o suporte seja capaz de transpassar a janela dentro de suas dimensões. O módulo central tem concepção partindo da mesa responsável por assentar as bombas de vácuo, sendo esta reforçada a fim de garantir superfície estável e capaz de absorver a vibração proveniente do funcionamento desta. A consolidação destes se deu por simulação de comportamento quando submetido aos esforços respectivos as massas dos componentes e considerando reservatórios completamente cheios, considerado fator de segurança 1,5. Ainda é recomendado para o suporte destas estruturas, reguladores de altura a fim de realizar o nivelamento e estes com grande capacidade de absorção de vibrações. A modelagem 3D destes suportes já com as cores adotadas pelos equipamentos da continental é explicitada na Figura 54, juntamente a representação do permutador central e seus acoplamentos justificando sua dimensão horizontal.

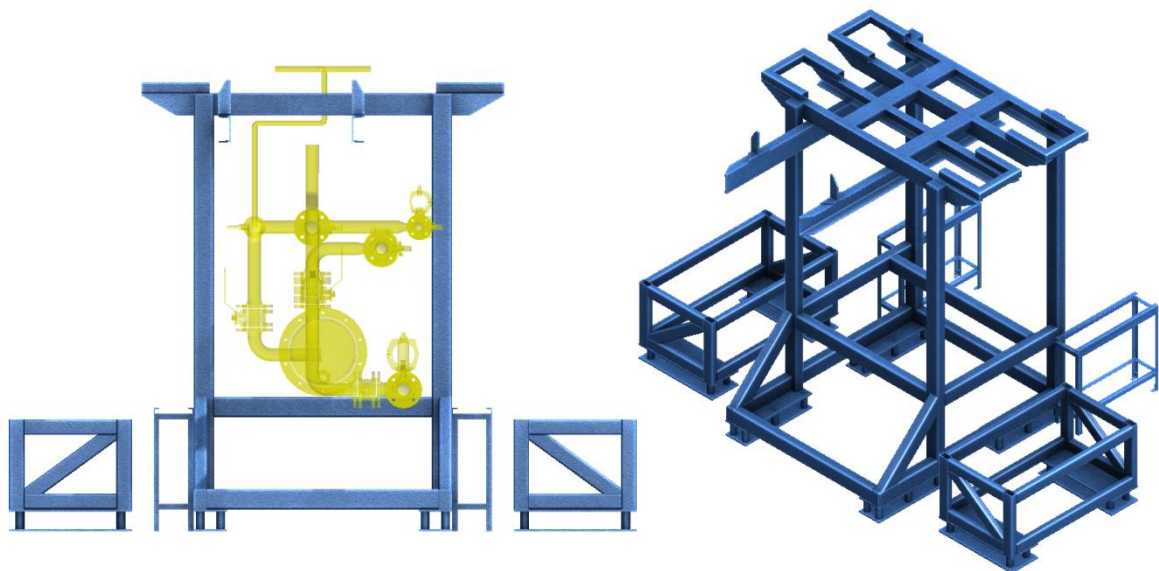


Figura 54 - Estrutura modular, vista frontal (esquerda) e vista isométrica (direita).

Com a estruturação central realizada fora possível posicionar os principais componentes, buscando uma disposição deste grupo para cada equipamento. Propicia também a possibilidade de representar as ligações entre os componentes, posicionando as válvulas proporcionais destinadas a água de arrefecimento na parte superior, a fim de facilitar o acesso a estas. Ainda acrescentada à válvula proporcional isolada destinada a regular o nível de vácuo, conectada a saída dos permutadores e ao tanque atmosférico. A resultante das decisões levantadas anteriormente é apresentada na Figura 55 em vista isométrica para melhor visualização.

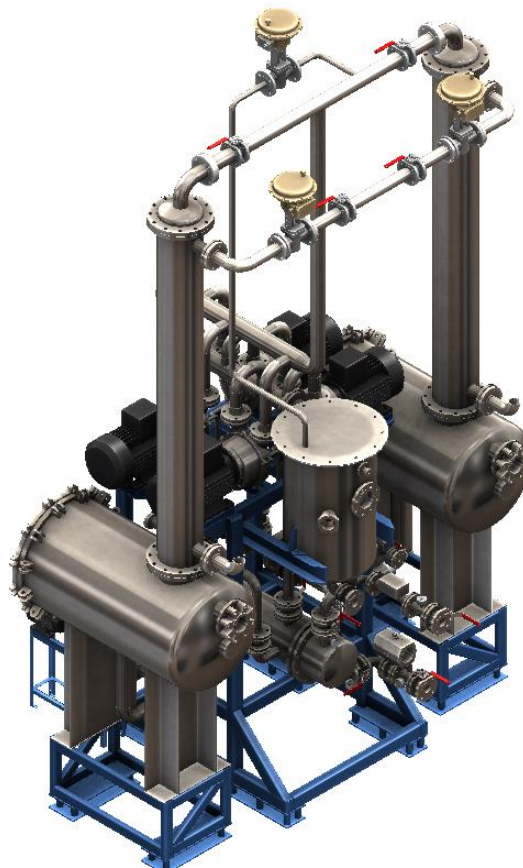


Figura 55 - Vista isométrica do conjunto central.

Com o conjunto principal devidamente modelado, se realizou o posicionamento na galeria conforme previsto anteriormente, e também foram inseridos nesta montagem os demais componentes. Foram adicionadas representações de trabalhadores, a fim de transmitir uma melhor noção de espaço, tanques e bombas dispostos da melhor maneira encontrada seguindo sempre a ordem: componente 1, componente 2, ligação entre estes e análise do ao redor. Calhas elétricas foram inseridas partindo do quadro elétrico (a nível superior) disseminando cabos até os três módulos distribuídos na estação, juntamente a esta foram inseridos os módulos elétricos e a UTA, além do quadro elétrico geral, conforme é expresso na Figura 56, estes foram posicionados conforme citados os grupos no PI&D.

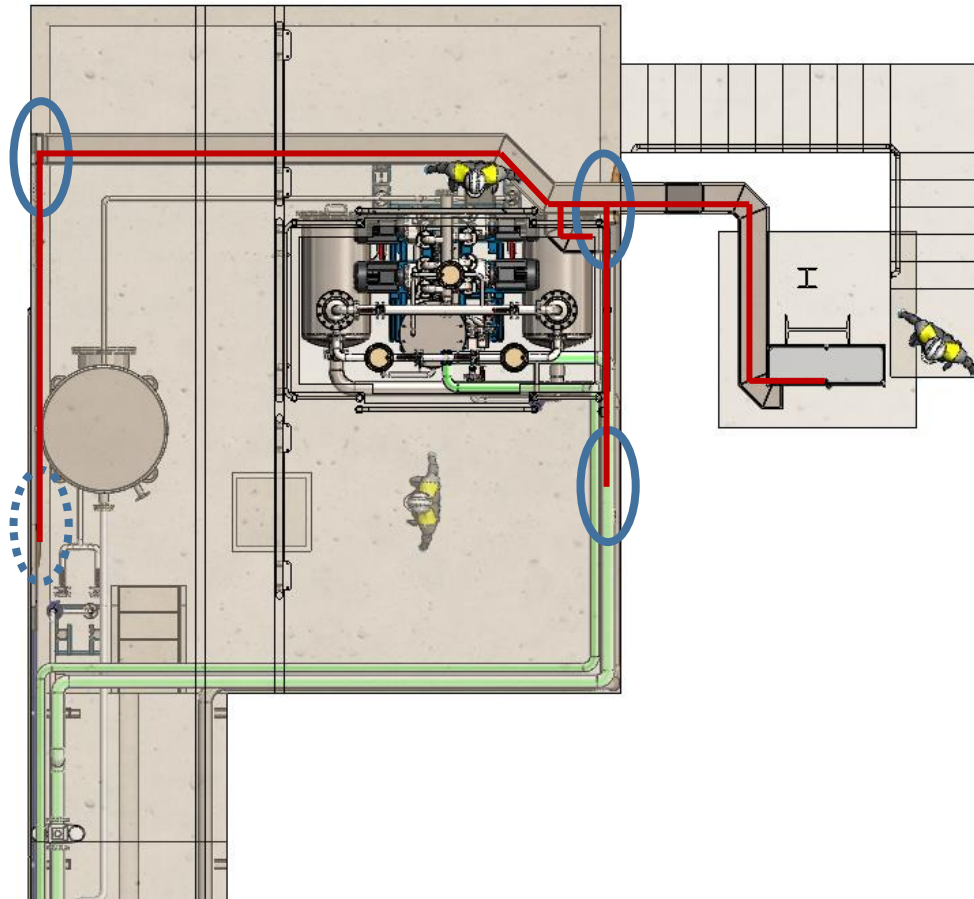


Figura 56 - Vista superior da estação ressaltando a linha de conexões elétricas dos módulos (circulados e UTA pontilhada) a partir do painel geral.

Por fim, buscando uma melhor visualização dos resultados finais em panorâma geral, é apresentada na Figura 57 uma visualização sem texturas.

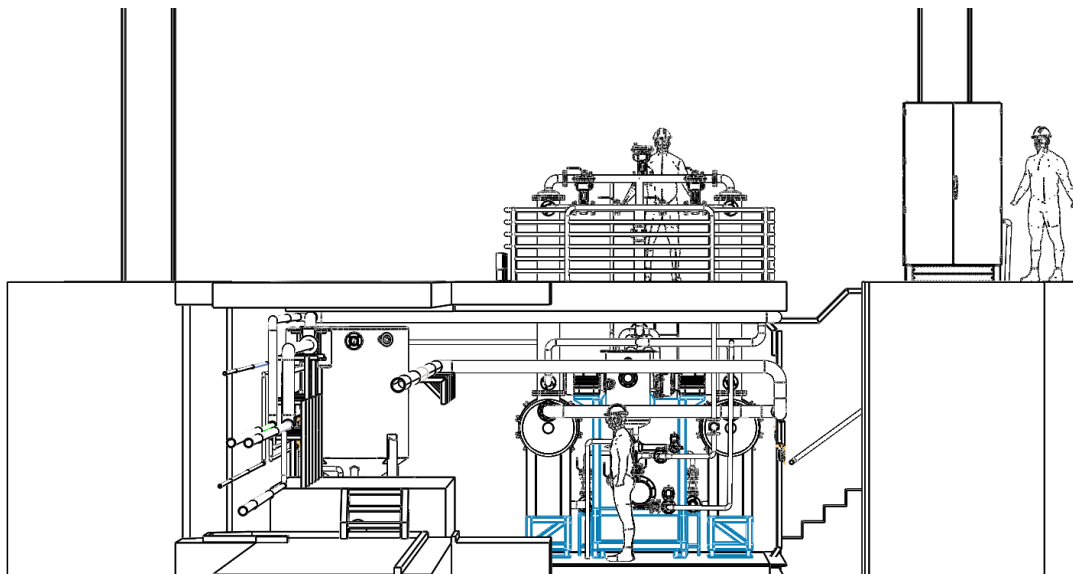


Figura 57 - Vista em perspectiva frontal da estacção.

Apresentando vistas isométricas, foram criadas renderizações, tanto para uma versão com alguns elementos estruturais suprimidos para uma melhor visualização, quando outra que trás consigo todos os elementos tridimensionais executados, estas visualizações são apresentadas na Figura 59 e Figura 59 respectivamente.

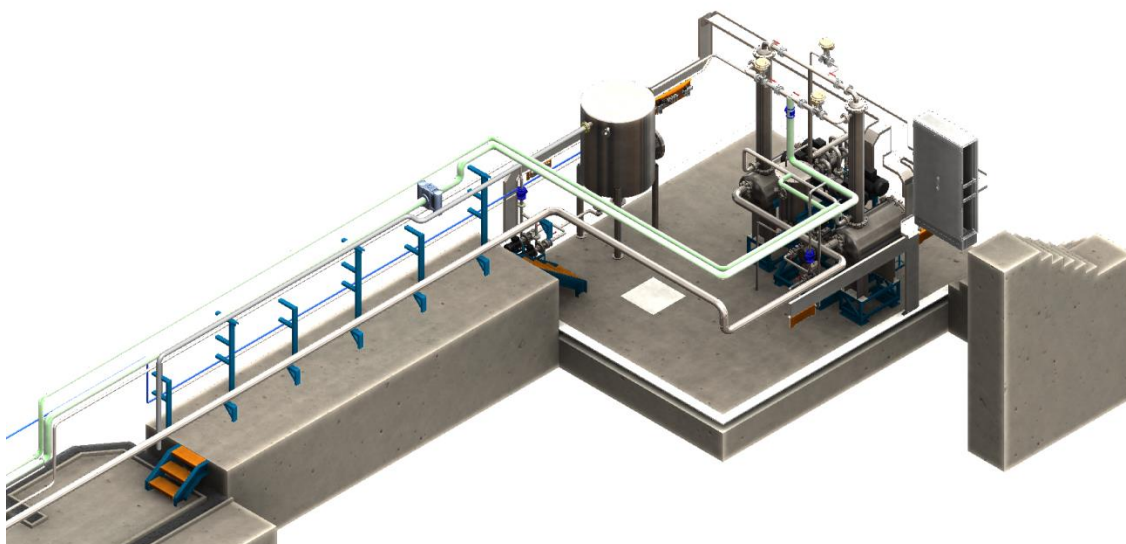


Figura 59 - Vista isométrica com elementos suprimidos.

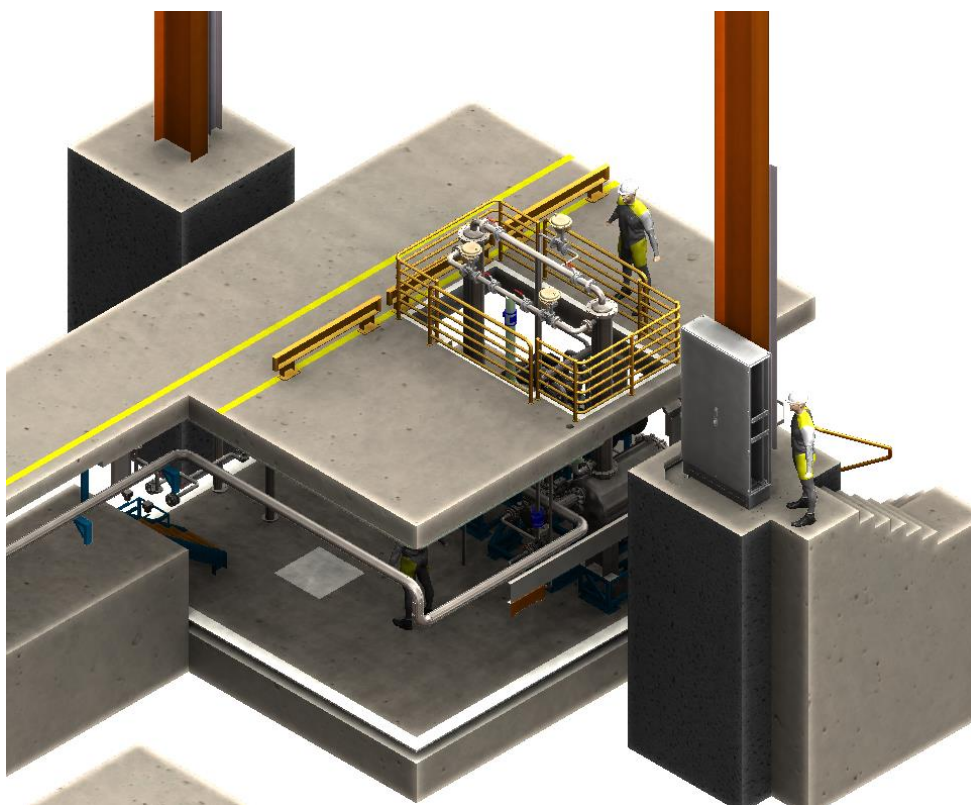


Figura 59 - Vista isométrica da estação.

# CONCLUSÕES

- 5.1 Conclusões
- 5.2 Propostas de trabalhos futuros

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Conclusões

A proposta inicial deste projeto se baseou na elaboração de um sistema compacto e otimizado, dentro das limitações e adequações impostas a este, sendo estas de espaço e/ou normas da empresa. O estudo se deu baseado inicialmente perante sistemas semelhantes e posteriormente submetidos a análise desde entradas e saídas, englobando dimensionamentos dos componentes protagonistas e findando na definição de disposição. Todo este processo ainda se deu buscando dinamicidade entre os componentes trazendo uma visão global do projeto, desde os principais elementos até pequenos detalhes previsíveis.

Um ponto abordado que não teve solução satisfatória foi a questão do espaço, que realizado antes dos demais estudos devido a urgência para a escavação, estipulado antes dos componentes propriamente dimensionados. Caso o espaço pudesse ter sido determinado ao fim do estudo poderia ser submetido a redução de cerca de 50%, implicando em redução dos custos de escavação.

Os resultados obtidos são admitidos como positivos, visto que em suma os objetivos propostos foram cumpridos, passados dimensionamentos de tanques, permutadores e disposição de tubagem, dentre outros. Uma vez que o sistema resultante possui uma capacidade muito maior, podendo operar desde uma até quatro bombas em simultâneo, assim podendo alimentar até 600 prensas. Em funcionamento inicial, apenas metade do sistema deve estar em funcionamento e apenas uma das bombas de vácuo. Cumpre a proposta de disponibilidade em torno de 99%, levando em conta que quando um equipamento falha, outro entra em ação enquanto o equipamento danificado é reparado e/ou substituído dentre todas as redundâncias instauradas.

O sistema de extração de condensados fora definido de forma a possibilitar acumulação dos resíduos, assim permitindo estudo aprofundado destes e consequentemente abrindo novas possibilidades de estudo para os processos envolvidos. A análise perante visão global de um sistema deste porte permite prever e otimizar a disposição de forma eficaz além de permitir ajustes pontuais e trazendo grandes resultados em termos de compactação como observado.

Foram levantados diversos pontos que podem ser aprofundados separadamente, explorando diferentes propostas e o estado da arte para seus componentes. Retorna para a empresa o projeto de um sistema mais assertivo e com parâmetros e processo conhecidos, explicitadas as incógnitas restantes e variáveis responsáveis pelas maiores variações dimensionais dos equipamentos.



## 5.2 Propostas de trabalhos futuros

A partir do funcionamento desta estação será possível precisar as características e parâmetros dos fluidos e resíduos, após a instalação uma simples coleta de dados e análise dos resíduos extraídos pode efetuar esta tarefa. Permitindo futuros cálculos ainda mais refinados e maior eficiência do sistema, e trazendo viés para projetos de posteriores e alterações nas demais estações de forma mais econômica e compacta dentro da própria empresa, diante de conhecimento consolidado perante os processos decorrentes.

Realizar estudo de viabilidade para estação em nível térreo, pois desta forma reduz os altos custos observados para escavação e ainda trás novas possibilidades de disposição destes.

Fugas durante substituições de diafragmas que propiciam entrada de ar no sistema, assim incrementando muito o caudal de vapor debitado pelo vácuo uma vez que este sob pressão negativa passa a aspirar ar atmosférico. Este caudal é uma grande incógnita perante as diversas variáveis que os diafragmas são submetidos. Um recente estudo levantou possibilidades de influenciadores perante esta problemática, donde várias hipóteses foram descartadas e novos estudos assertivos foram propostos (Rech 2020). O avanço de estudos para determinação e/ou contenção deste se torna benéfica para o desenvolvimento assertivo para as estações de vácuo. Existe ainda a possibilidade de algumas prensas de cura apresentarem uma válvula solenóide defeituosa, gerando vazamento de 1,65 a 1,75 MPa durante 30 segundos até esta ser detectada (informação extraída de documentação interna). Tendo em vista esses vazamentos de pressão, se torna intuitiva a necessidade de prevenir estes a fim de uma estação de vácuo mais assertiva e calibrada chegando em reduções de caudais de até 40% em relação as estimativas realizadas neste trabalho, impactando assim diretamente os componentes como bombas, permutadores e tanques, assim possibilitando futuros projetos de estações e funcionamento das já existentes de forma mais econômica.





## BIBLIOGRAFIA



## 6 BIBLIOGRAFIA

- APTA. n.d. "Acessórios de Tubagens Para Tubos de Aço." Retrieved January 11, 2020 (<http://www.apta.pt/>).
- Bombay, Indian Institute of Technology. 2016. *Properties of Water and Steam (Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance)*.
- Brasil, Busch Bombas e Sistemas de Vácuo. n.d. "Bombas de Vácuo de Anel Líquido - Tecnologia de Vácuo Clássica Mas Também de Última Geração - News Detail." Retrieved December 31, 2019 (<https://www.buschvacuum.com/br/pt/news/liquid-ring-vacuum-pumps-classic-vacuum-technology>).
- Brasileira de Polímeros Brasil Costa, Associação, Helson M. da, Leila L. Y, Regina C. R, and Cristina R. G. 2003. "Polímeros: Ciência e Tecnologia." 13(2):125–29.
- Company, Spirax Sarco. n.d. "Spirax Sarco | First for Steam Solutions." Retrieved January 11, 2020 (<https://www.spiraxsarco.com/>).
- Costa, Helson M. da, Leila L. Y. Visconte, Regina C. R. Nunes, and Cristina R. G. Furtado. 2003. "Aspectos Históricos Da Vulcanização." *Polímeros* 13(2):125–29.
- DE, Continental. n.d. "Conti CrossTrac HD3." Retrieved December 27, 2019 (<https://www.continental-pneus.pt/pesados/produtos/pneus/construction/conti-crosstrac-hd3>).
- Due Jensens, Poul. 2004. *GRUNDFOS INDUSTRY PUMP HANDBOOK PUMP HANDBOOK GRUNDFOS Management A/S*.
- Grunfos Data Booklet. n.d. *NB, NBE*.
- Hauser, Endress. n.d. "Instrumentação de Campo Personalizada | Endress+Hauser." Retrieved January 11, 2020 (<https://www.pt.endress.com/pt/produtos>).
- INC., FBV. n.d. "FBV Valve Engineered Solutions." Retrieved January 11, 2020 (<http://www.fbvalve.com/>).
- Incropera, F. P. and D. P. DeWitt. 2008. "Fundamentos de Transferência de Calor e Massa." *Water*.
- Kakaç, Sadik, Hongtan Liu, and Anchasa Pramuanjaroenkij. 2012. *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, Third Edition*. Vol. 6.
- Moutinho, A. M. C.; Silva, Maria Eugénia S. Froteira & Cunha, Maria Áurea C. M. Isidoro. 1980. *TECNOLOGIA DE VÁCUO*.
- Munson, Bruce R., Donald F. Young, and Theodore H. Okiishi. 2006. "Fundamentals of Fluid Mechanics, 5e Édition." 769.
- Rafael, José, Fernandes Andrade, Engenheiro Manuel, Soares Orientador, Na Feup, Clito Félix, and Alves Afonso. 2014. *Projeto de Rede de Produção e Distribuição de Vácuo Usado Na Vulcanização de Pneus*.
- Rech, Chayanne. 2020. *Determinação Das Condições Ideais de Enformação Dos*

*Diafragmas de Borracha Na Vulcanização de Pneus.*

Telles, Pedro. 2012. "Tubulações Industriais." 260.

TEMA. 2007. *STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION.*

Toghraei, Moe. 2019. *Piping and Instrumentation Diagram Development.*

(Brasileira de Polímeros Brasil Costa et al. 2003; Costa et al. 2003; Moutinho, A. M. C.; Silva, Maria Eugénia S. Froteira & Cunha 1980)

# ANEXOS

## 7.1 Anexo 1 – Descrição dos principais requisitos da instalação



## 7 ANEXOS

### 7.1 Anexo 1 – Descrição dos principais requisitos da instalação

Os requisitos aqui listados fazem parte do documento MES (*Machine and Equipment Standard*), por se tratar de um documento confidencial serão trazidos apenas os requisitos essenciais para os componentes abordados neste estudo, sem expor diretamente o conteúdo e pormenores presentes no documento.

- Os componentes precisam ser projetados para operação contínua 24 horas por dia, 7 dias por semana, 340 dias por ano.
- Componentes principais que cumpram com a característica requisitada, conforme listado na Tabela 30.

Tabela 30 – Características requisitadas dos principais componentes.

Componente	Característica
Bomba de Vácuo	Anel líquido e estágio único
Permutador de Calor	Carcaça/Tubos
Bomba de Condensados	Elétrica
Tanque de Condensados	Aço inox
Tanque para Anel Líquido	Aço inox com interruptor de fluxo
Permutador para Anel Líquido	Carcaça/Tubos

- Tanque de Condensados com ao menos 1,7 litros de capacidade para cada prensa. Neste caso se tratando de 150 prensas, resulta em uma capacidade mínima de 255 litros.
- Saída dos permutadores a 30°C, ou seja, 303 K.

## 7.2 Anexo 2 – Gráficos de identificação do fator de correção (F)

Com o cruzamento dos parâmetros  $P$  e  $R$  é possível encontrar  $F$  nas tabelas a seguir. As tabelas são distintas pelas diferentes configurações de passagens correspondentes, sendo estas esquematizadas para cada um dos cinco casos já consolidados.

Caso 1 - Para permutadores casco e tubo com uma única passagem no casco e duas ou múltiplas de dois nos tubos, como representado na Figura 60, se tem o gráfico apresentado na Figura 61. (Kakaç et al. 2012)

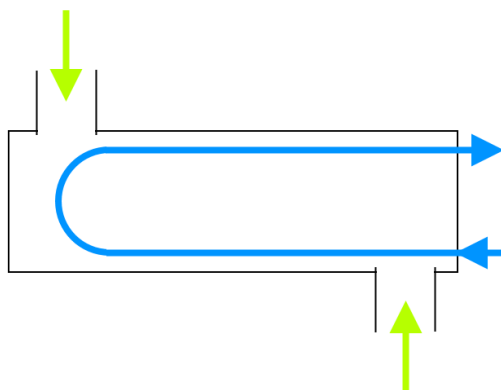


Figura 60 - Uma passagem no casco e duas ou múltiplas de duas nos tubos (Caso 1).

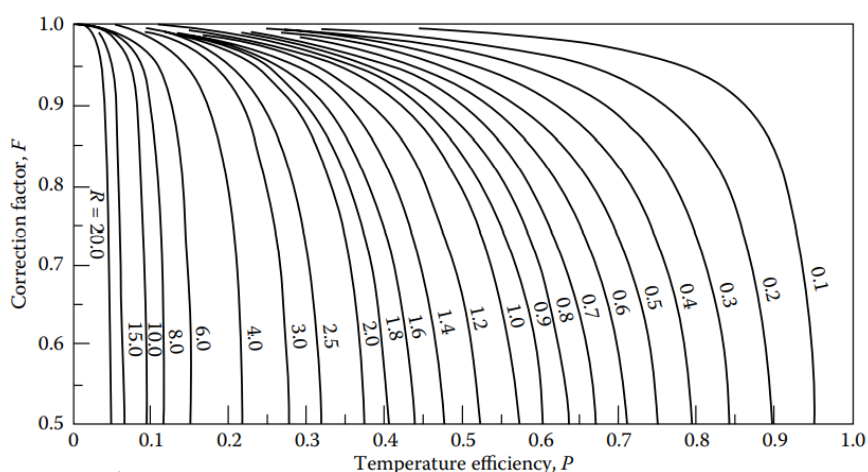


Figura 61 - Gráfico do fator de correção para o caso 1. (Kakaç et al. 2012)

Caso 2 - Para permutadores casco e tubo com duas passagens no casco e quatro ou múltiplas de quatro nos tubos, como representado na Figura 62, se tem o gráfico apresentado na Figura 63.



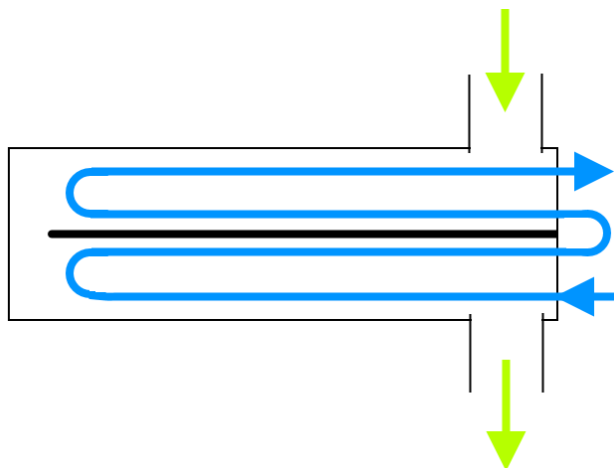


Figura 62 - Duas passagens no casco e quatro ou múltiplas de quatro nos tubos (Caso 2).

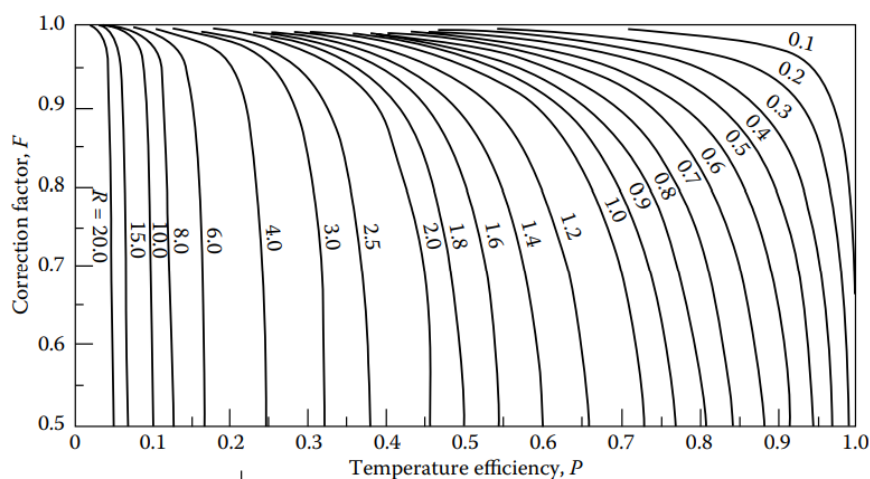


Figura 63 - Gráfico do fator de correção para o caso 2. (Kakaç et al., 2012)

Caso 3 - Para permutadores casco e tubo com três passagens no casco e seis ou mais passagens nos tubos, como representado na Figura 64, se tem o gráfico apresentado na Figura 65.

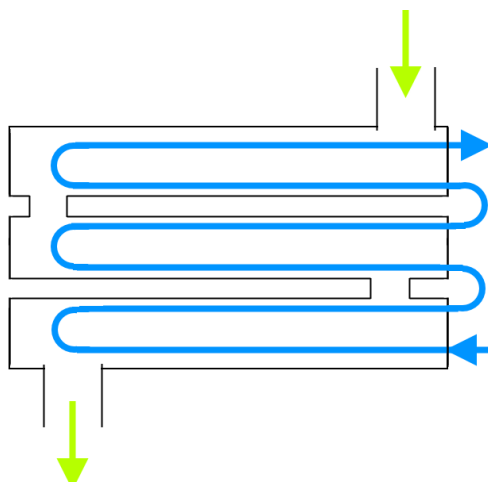


Figura 64 - Três passagens no casco e seis ou mais nos tubos (Caso 3).

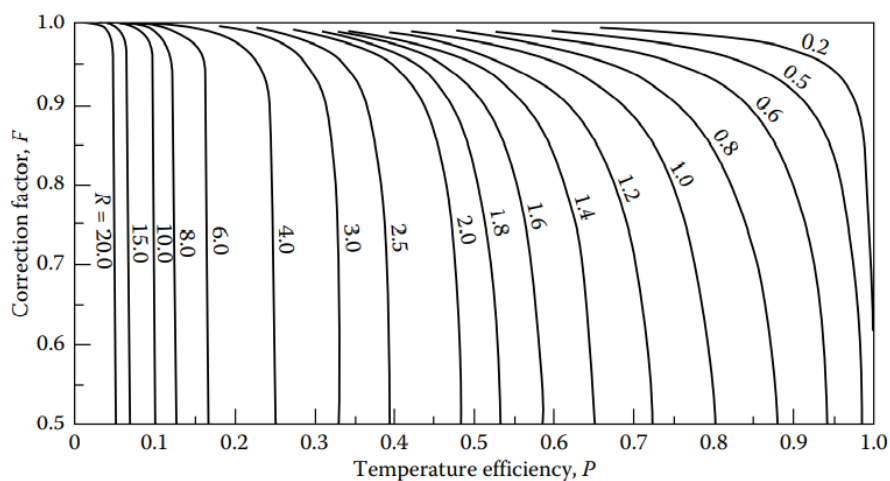


Figura 65 - Gráfico do fator de correção para o caso 3. (Kakaç et al., 2012)

Caso 4 - Para permutadores casco e tubo com passagem de fluxo dividido no casco e para qualquer número de passes nos tubos, como representado na Figura 66, se tem o gráfico apresentado na Figura 67.

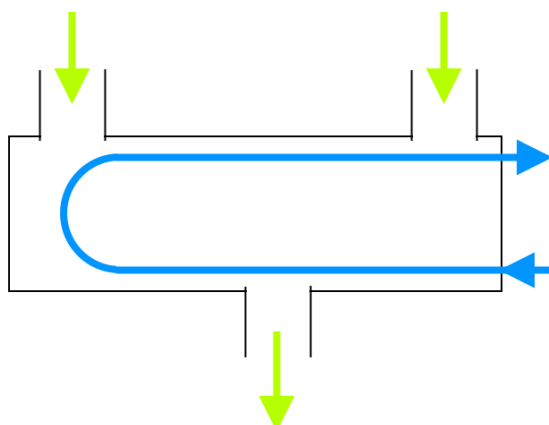


Figura 66 – Passagem de fluxo dividido no casco (Caso 4).

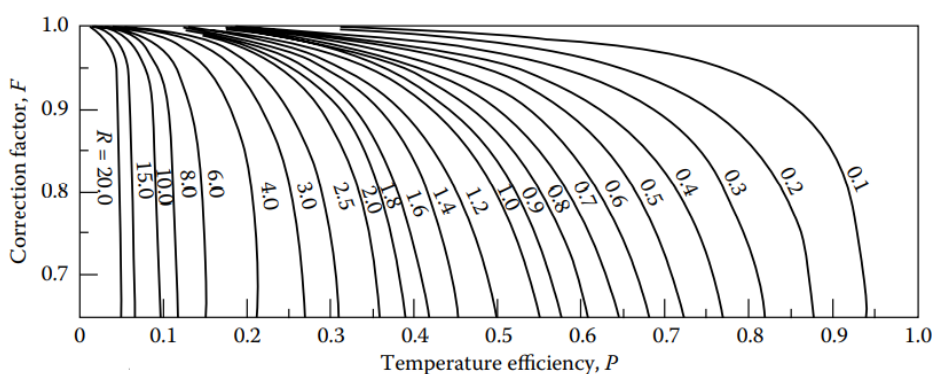


Figura 67 - Gráfico do fator de correção para o caso 4. (Kakaç et al., 2012)

Caso 5 - Para permutadores casco e tubo com uma única passagem dividida de fluxo único no casco e duas passagens nos tubos, como representado na Figura 68, se tem o gráfico apresentado na Figura 69.

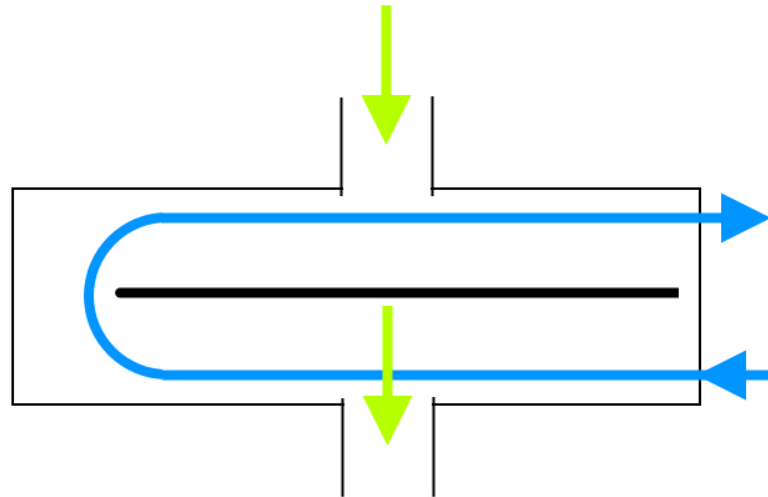


Figura 68 - Passagem dividida de fluxo no casco e duas passagens nos tubo (Caso 5).

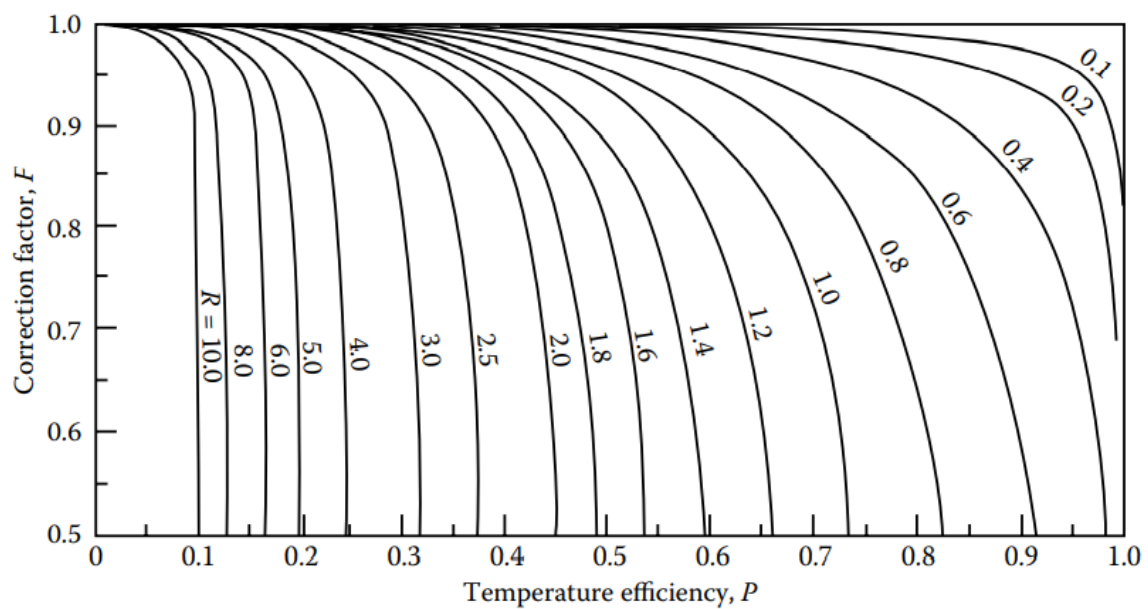


Figura 69 - Gráfico do fator de correção para o caso 5. (Kakaç et al., 2012)

### 7.3 Anexo 3 - Tabela de propriedades termodinâmicas do vapor

Para situações de saturação do vapor de água, ou seja, onde este apresenta uma mistura entre gás e condensados, é possível extrair com precisão suas propriedades de tabelas já consolidadas.

T °C	P kPa	v <sub>L</sub> (x10 <sup>3</sup> ) m <sup>3</sup> /kg	v <sub>V</sub> m <sup>3</sup> /kg	u <sub>L</sub> kJ/kg	u <sub>V</sub> kJ/kg	h <sub>L</sub> kJ/kg	Δh <sup>V</sup> kJ/kg	h <sub>V</sub> kJ/kg	s <sub>L</sub> kJ/(kg.K)	s <sub>V</sub> kJ/(kg.K)
0	0,611	1,000	206,3	-0,04	2375,7	-0,04	2501,7	2501,6	0,0000	9,1578
0,01	0,611	1,000	206,2	0,0	2375,6	0,0	2501,6	2501,6	0,0	9,1575
5	0,872	1,000	147,2	21,01	2382,4	21,01	2489,7	2510,7	0,0762	9,0269
10	1,227	1,000	106,4	41,99	2389,3	41,99	2477,9	2519,9	0,1510	8,9020
15	1,704	1,001	77,98	62,94	2396,2	62,94	2466,1	2529,1	0,2243	8,7826
20	2,337	1,002	57,84	83,86	2403,0	83,86	2454,3	2538,2	0,2963	8,6684
25	3,166	1,003	43,40	104,8	2409,9	104,8	2442,5	2547,3	0,3670	8,5592
30	4,241	1,004	32,93	125,7	2416,7	125,7	2430,7	2556,4	0,4365	8,4546
35	5,622	1,006	25,24	146,6	2423,5	146,6	2418,8	2565,4	0,5049	8,3543
40	7,375	1,008	19,55	167,4	2430,2	167,5	2406,9	2574,4	0,5721	8,2583
45	9,582	1,010	15,28	188,3	2436,9	188,4	2394,9	2583,3	0,6383	8,1661
50	12,34	1,012	12,04	209,2	2443,6	209,3	2382,9	2592,2	0,7035	8,0776
55	15,74	1,015	9,579	230,2	2450,2	230,2	2370,8	2601,0	0,7677	7,9925
60	19,92	1,017	7,679	251,1	2456,8	251,1	2358,6	2609,7	0,8310	7,9108
65	25,01	1,020	6,202	272,0	2463,2	272,0	2346,3	2618,4	0,8933	7,8322
70	31,16	1,023	5,046	292,9	2469,7	293,0	2334,0	2626,9	0,9548	7,7565
75	38,55	1,026	4,134	313,9	2476,0	313,9	2321,5	2635,4	1,0154	7,6835
80	47,36	1,029	3,409	334,9	2482,3	334,9	2308,8	2643,8	1,0753	7,6132
85	57,80	1,033	2,829	355,9	2488,5	355,9	2296,1	2652,0	1,1343	7,5454
90	70,11	1,036	2,361	376,9	2494,6	376,9	2283,2	2660,1	1,1925	7,4799
95	84,53	1,040	1,982	397,9	2500,6	398,0	2270,2	2668,1	1,2501	7,4166
100	101,33	1,044	1,673	419,0	2506,5	419,1	2256,9	2676,0	1,3069	7,3554
105	120,8	1,048	1,420	440,1	2512,3	440,2	2243,6	2683,8	1,3630	7,2962
110	143,3	1,052	1,210	461,2	2518,0	461,3	2230,0	2691,3	1,4185	7,2388
115	169,1	1,056	1,036	482,4	2523,5	482,5	2216,2	2698,7	1,4733	7,1833
120	198,5	1,061	0,8915	503,5	2529,0	503,7	2202,2	2706,0	1,5276	7,1293
125	232,1	1,065	0,7704	524,8	2534,3	525,0	2188,1	2713,0	1,5813	7,0770
130	270,1	1,070	0,6681	546,0	2539,4	546,3	2173,6	2719,9	1,6344	7,0261
135	313,0	1,075	0,5820	567,4	2544,4	567,7	2158,9	2726,6	1,6870	6,9767
140	361,4	1,080	0,5085	588,7	2549,3	589,1	2144,0	2733,1	1,7390	6,9284
145	415,5	1,085	0,4461	610,2	2554,0	610,6	2128,8	2739,4	1,7906	6,8816
150	476,0	1,091	0,3924	631,6	2558,6	632,1	2113,2	2745,4	1,8416	6,8358
155	543,3	1,096	0,3466	653,2	2563,0	653,8	2097,4	2751,2	1,8923	6,7912
160	618,1	1,102	0,3068	674,8	2567,1	675,5	2081,3	2756,7	1,9425	6,7475
165	700,8	1,108	0,2725	696,5	2571,2	697,3	2064,8	2762,1	1,9923	6,7049
170	792,0	1,114	0,2426	718,2	2574,9	719,1	2047,9	2767,1	2,0416	6,6630
175	892,5	1,121	0,2166	740,1	2578,6	741,1	2030,8	2771,8	2,0907	6,6221
180	1003	1,128	0,1938	762,0	2581,9	763,1	2013,1	2776,3	2,1393	6,5819
185	1123	1,134	0,1739	784,0	2585,1	785,3	1995,2	2780,4	2,1876	6,5425
190	1255	1,142	0,1563	806,1	2588,1	807,5	1976,7	2784,3	2,2356	6,5036
195	1399	1,149	0,1409	828,3	2590,8	829,9	1957,9	2787,8	2,2833	6,4654
200	1555	1,156	0,1272	850,6	2593,2	852,4	1938,6	2790,9	2,3307	6,4278
205	1725	1,164	0,1151	873,0	2595,4	875,0	1918,8	2793,8	2,3778	6,3906
210	1908	1,173	0,1042	895,5	2597,3	897,7	1898,5	2796,2	2,4247	6,3539
215	2106	1,181	0,09465	918,2	2599,0	920,6	1877,6	2798,3	2,4713	6,3177
220	2320	1,190	0,08604	940,9	2600,3	943,7	1856,2	2799,9	2,5178	6,2817
225	2550	1,199	0,07837	963,8	2601,4	966,9	1834,3	2801,2	2,5641	6,2461
230	2798	1,209	0,07145	986,9	2602,1	990,3	1811,7	2802,0	2,6102	6,2107
235	3064	1,219	0,06527	1010,1	2602,5	1013,9	1788,5	2802,3	2,6562	6,1756
240	3348	1,229	0,05965	1033,5	2602,5	1037,6	1764,6	2802,2	2,7020	6,1406
245	3652	1,240	0,05462	1057,1	2602,1	1061,6	1740,0	2801,6	2,7478	6,1057
250	3978	1,251	0,05004	1080,8	2601,4	1085,8	1714,7	2800,4	2,7935	6,0708
255	4325	1,263	0,04591	1104,8	2600,3	1110,3	1688,5	2798,7	2,8392	6,0360

Figura 70 – Tabela de propriedades para vapor de água saturado. (Incropera and DeWitt 2008)

## 7.4 Anexo 4 - Especificações da bomba A333

Na Figura 71 estão expressos parâmetros da bomba A333 das empresas de origem alemã, por isso a língua utilizada. O caudal de sucção da bomba é expresso em  $\text{m}^3/\text{h}$ , enquanto o requisito de energia em kW e por fim, o caudal de anel líquido requerido é expresso em  $\text{l}/\text{min}$  para as curvas respectivas as temperaturas de anel líquido de 15 e 50 °C já demarcadas para a pressão solicitada pelo sistema.

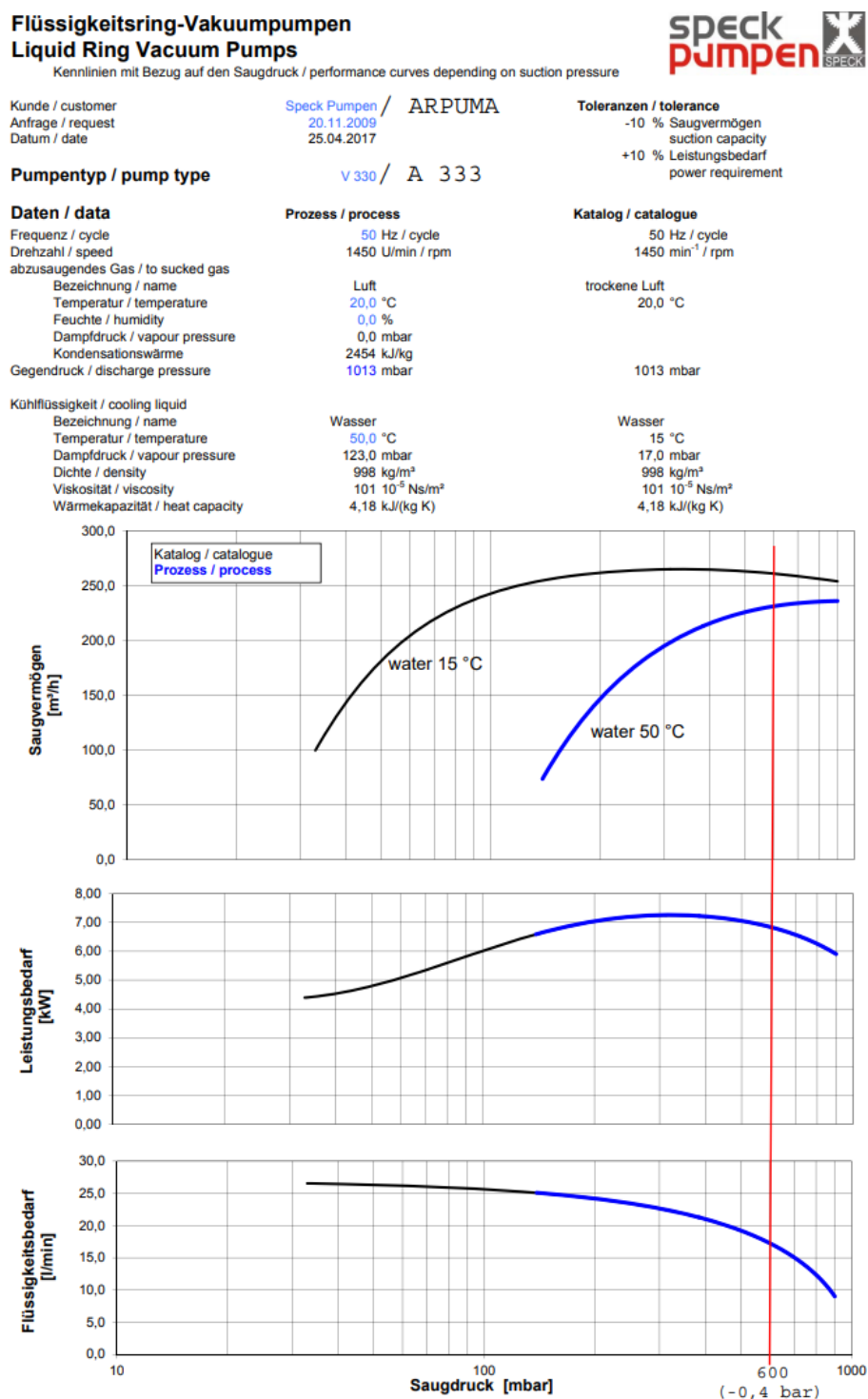


Figura 71 - Propriedades da bomba A333.